



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA,**  
**GEODESIA Y CARTOGRAFÍA**  
**TITULACIÓN DE MÁSTER EN INGENIERÍA GEODÉSICA Y**  
**CARTOGRAFÍA**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD DE RAYOS Y SU RELACIÓN CON**  
**LAS VARAIBLES CLIMÁTICAS DE TEMPERATURA Y**  
**PRECIPITACIÓN EN ESPAÑA**

**Madrid, julio, 2014**

***Alumna: Sarah Cernuda Rodríguez***

***Tutor: Pilar Moreno Regidor***  
***Cotutor: Antonio Vázquez Hoehne***

## Índice

<b>I.</b>	<b>MEMORIA</b>	
<b>1.</b>	<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>7</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>8</b>
<b>3.</b>	<b>TRATAMIENTO DE LOS DATOS .....</b>	<b>9</b>
3.1.	SELECCIÓN DE DATOS A UTILIZAR EN EL TRABAJO .....	9
3.2.	GENERACIÓN DE GRÁFICAS .....	12
3.2.1.	<i>Primera fase.....</i>	<i>12</i>
3.2.1.1.	<i>Programación de temperatura en estaciones por descarga.....</i>	<i>8</i>
3.2.1.2.	<i>Programación de temperatura en estaciones por descarga.....</i>	<i>11</i>
3.2.1.3.	<i>Programación de temperatura en estaciones por descarga.....</i>	<i>13</i>
3.2.1.4.	<i>Programación de temperatura en estaciones por descarga.....</i>	<i>14</i>
3.2.2.	<i>Segunda fase.....</i>	<i>19</i>
3.2.3.	<i>Tercera fase .....</i>	<i>20</i>
3.2.4.	<i>Cuarta fase.....</i>	<i>22</i>
<b>4.</b>	<b>INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS .....</b>	<b>24</b>
<b>5.</b>	<b>SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN .....</b>	<b>28</b>
5.1.	ESTADO DEL ARTE .....	28
5.2.	MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN .....	28
5.2.1.	<i>Inverso de la distancia (IDWA) .....</i>	<i>28</i>
5.2.2.	<i>Thin plate smoothing splines .....</i>	<i>29</i>
5.2.3.	<i>Co-kriging.....</i>	<i>30</i>
5.2.4.	<i>Regresión múltiple .....</i>	<i>31</i>
<b>6.</b>	<b>APLICACIÓN DE LA INTERPOLACIÓN .....</b>	<b>32</b>
6.1.	TRATAMIENTO DE LOS DATOS .....	32
6.1.1.	<i>Selección de zonas geográficas .....</i>	<i>32</i>
6.1.2.	<i>Selección de los datos de las variables a interpolar .....</i>	<i>34</i>
6.2.	DESCARGA DE DATOS COMPLEMENTARIOS (CNIG).....	35
6.3.	SELECCIÓN DE FECHAS ADECUADAS PARA INTERPOLAR .....	36
6.4.	APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN SELECCIONADOS .....	47
6.4.1.	<i>Interpolación de temperatura .....</i>	<i>47</i>
6.4.2.	<i>Interpolación de precipitación .....</i>	<i>49</i>
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
7.1.	ANÁLISIS Y CLASIFICACIÓN DE LAS GRÁFICAS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN.....	51
7.2.	RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA VARIABLE DE TEMPERATURA.....	54



7.3.	RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA VARIABLE DE PRECIPITACIÓN .....	55
8.	CONCLUSIONES .....	56
9.	PRESUPUESTO .....	58

## II. ANEXOS

1. Gráficas de las variables climáticas
2. Resultados de la interpolación
3. Mapas de los modelos de interpolación

## **Índice de figuras**

Figura 1. Base de datos creada en PostGIS .....	8
Figura 2. Orden ogr2ogr ejecutada desde la consola de OSGeo4W .....	11
Figura 3. Gráfica de temperatura en estación por descarga con valor de texto en su identificador .....	12
Figura 4. Gráfica de temperatura en estación por descarga con valor numérico en su identificador y una única variable (temperatura del aire) .....	13
Figura 5. Gráfica de temperatura en estación por descarga con valor numérico en su identificador y dos variables (temperatura del aire y temperatura del suelo) .....	14
Figura 6. Gráfica de temperatura en estación por conjunto de descargas con valor de texto en su identificador .....	15
Figura 7. Gráfica de temperatura en estación por conjunto de descargas con valor numérico en su identificador y una única variable (temperatura del aire) .....	15
Figura 8. Gráfica de temperatura en estación por conjunto de descargas con valor numérico en su identificador y dos variables (temperatura del aire y temperatura del suelo) .....	16
Figura 9. Gráfica de precipitación en estación por descarga con valor de tipo texto en su identificador .....	17
Figura 10. Gráfica de precipitación en estación por conjunto de descargas .....	18
Figura 11. Gráfica de temperatura en estación por conjunto de descargas con el eje de ordenadas corregido (10 unidades) .....	19
Figura 12. Gráfica de temperatura en estación por conjunto de descargas e histograma de precipitación .....	20
Figura 13. Gráfica de temperatura en estación por conjunto de descargas con temperatura del aire e histograma de precipitación corregido .....	21
Figura 14. Gráfica de temperatura en estación por descarga con parón de registro e histograma de precipitación .....	22
Figura 15. Sector costero llano, selección zona de Matalascañas .....	23
Figura 16. Sector costero montañoso barlovento, selección zona de Cudillero.....	23
Figura 17. Sector costero montañoso sotavento, selección zona de Dalías .....	24
Figura 18. Sector interior llano seco, selección zona de Alcázar de San Juan .....	24
Figura 19. Sector interior llano regadío, selección zona de Lleida.....	24



Figura 20. Sector interior montañoso sotavento, selección zona de Riaño .....	25
Figura 21. Sector interior montañoso barlovento, selección zona de Ubrique .....	25
Figura 22. Sector interior montañoso de dos vertientes, selección zona de Navacerrada .....	25
Figura 23. Zonas de influencia para la interpolación sobre capa AEMET con coordenadas proyectadas.....	32
Figura 24. Áreas de influencia con 60 y 100 km de diámetro sobre las zonas costeras en color rosa claro y oscuro respectivamente .....	33
Figura 25. Consulta SQL para obtener la información para interpolar en tablas .....	34
Figura 26. MDT25 correspondientes a las zonas a interpolar .....	35
Figura 27. La tormenta se sitúa en la hombrera de la curvatura térmica .....	50
Figura 28. La tormenta se sitúa sobre la cornisa de la curvatura térmica .....	50
Figura 29. La tormenta se sitúa situada sobre el escarpe de la curvatura térmica .....	50
Figura 30. La tormenta situada con cierto alejamiento del escarpe “tras escarpe” .....	50
Figura 31. Rayo situado sobre descenso gradual denominado “declive” .....	53
Figura 32. Rayo situado sobre descenso gradual con pendiente más notable que en el declive “cuesta” .....	53
Figura 33. Rayo situado sobre “pie de bárcena” .....	53
Figura 34. Situación con poca variación térmica nocturna .....	54
Figura 35. Situación de tímida variación térmica nocturna (vallejos en llanura).....	54
Figura 36. Resumen general del presupuesto del trabajo .....	59
Figura 37. Informe visual del resumen de trabajo de los recursos empleados .....	59

## **Índice de tablas**

Tabla 1. Tabla est_ry_1500m creada con SQL .....	9
Tabla 2. Tabla datest_ry1500m creada con SQL .....	9
Tabla 3. Tablas con datos de temperatura y precipitación creadas con SQL .....	10
Tabla 4. Tablas con datos de temperatura y precipitación para conjuntos de descargas creadas con SQL.....	10
Tabla 5. Clasificación en función de la cantidad de precipitación registrada en mm .....	20
Tabla 6. Fechas para interpolar en función de la situación meteorológica .....	26
Tabla 7. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona de costa barlovento .....	37
Tabla 8. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona costa llano. ....	38
Tabla 9. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona costa sotavento .....	39
Tabla 10. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona interior llano regadío.....	41
Tabla 11. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona interior llano seco .....	42
Tabla 12. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona interior montañoso dos vertientes .....	43
Tabla 13. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona interior montañoso barlovento .....	44
Tabla 14. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona interior montañoso sotavento .....	46
Tabla 15. Datos para interpolación de temperatura (prueba 1).....	47
Tabla 16. Datos para interpolación de temperatura (prueba 2).....	48
Tabla 17. Datos para interpolación de temperatura (tercera prueba) .....	48
Tabla 18. Datos para interpolación de precipitación (prueba 1) .....	49
Tabla 19. Datos para interpolación de precipitación (prueba 2) .....	49
Tabla 20. Datos para interpolación de precipitación (prueba 3) .....	49



---

Tabla 21. Resultado estadístico para las gráficas de familias de rayos .....	56
Tabla 22. Resultado estadístico para las gráficas de rayos individuales diurnos .....	56
Tabla 23. Resultado estadístico para las gráficas de rayos individuales nocturnos .....	57

## 1. Antecedentes

El rayo es una descarga eléctrica de origen natural, producido durante una tormenta eléctrica, de enorme peligro para la sociedad. La descarga es visible con trayectorias sinuosas y de ramificaciones irregulares, llegando a recorrer muchos kilómetros de distancia. Según las estadísticas, este fenómeno natural causa anualmente en el mundo un promedio de 7.000 muertos y más de 15.000 heridos, incrementando la vulnerabilidad de las infraestructuras y dañando bienes.

Con el avance de las nuevas tecnologías, la investigación de este problema ha aumentado en lo relativo a la recogida de información y a la gestión de datos.

La Agencia Estatal de Meteorología (AEMet), creada con la entrada en vigor de la Ley 28/2006, tiene por objeto el desarrollo, implantación y prestación de servicios meteorológicos de competencia del Estado. Ostenta las condiciones de autoridad meteorológica del Estado, la condición de autoridad meteorológica aeronáutica y cuenta con una Sede Central en Madrid, además de una Delegación Territorial en cada una de las Comunidades Autónomas de España.

En este trabajo se cuenta con la observaciones registradas por la Red de Detección de Rayos (REDRA), con la información climática/meteorológica registrada por la red de estaciones automáticas de AEMet, y con la información orográfica y de la ocupación del suelo.

## 2. Objetivos

Con el fin de caracterizar mejor geográfica, temporal y meteorológicamente el comportamiento y la incidencia del rayo como fenómeno, es necesario analizar la relación de causalidad entre éste y las condiciones del contexto geográfico en el que se produce la descarga eléctrica, siendo especialmente relevantes las variables meteorológicas del entorno, en concreto temperatura y precipitación. Para contribuir a realizar dicho análisis, este trabajo tiene por objetivo estimar y estudiar las condiciones meteorológicas presentes en las localizaciones donde se han registrado los rayos, y así poder conocer mejor el proceso físico de la atmósfera que desencadenó el fenómeno.

En aquellas zonas donde no se disponga de datos sobre las condiciones meteorológicas, se realizará el mismo estudio citado anteriormente, teniendo ahora como objetivo específico, el estudio y aplicación de los métodos y técnicas de interpolación más adecuadas para las variables estudiadas.

### 3. Tratamiento de los datos

#### 3.1. Selección de datos a utilizar en el trabajo

Los datos de partida lo forman las observaciones registradas por REDRA (como sistema de localización de rayos), con el que se consigue una precisión mínima asumible inferior a 0,5 km, y la información climática/meteorológica registrada por AEMet.

Esta información que contiene datos comprendidos entre el 1 de noviembre del 2011 al 27 de noviembre del 2012, se reparte en tres tablas que se introducen en la base de datos espacial PostGIS para trabajar con ellos de una manera más cómoda.

- Tabla “AEMET”: contiene la información del nombre de la estación, provincia en la que se encuentra, su altitud, un identificador y una geometría.
- Tabla “obs”: contiene información sobre las variables meteorológicas observadas durante el periodo citado, la fecha de observación y un identificador.
- Tabla “rayosestudio”: contiene la fecha del impacto del rayo, información sobre errores, semiejes de la elipse de error y el día del año.

Para introducir la información en PostGIS es necesario crear una base de datos dentro del servidor denominada “rayos” (véase Figura 1), en la que se almacenará toda la información facilitada.

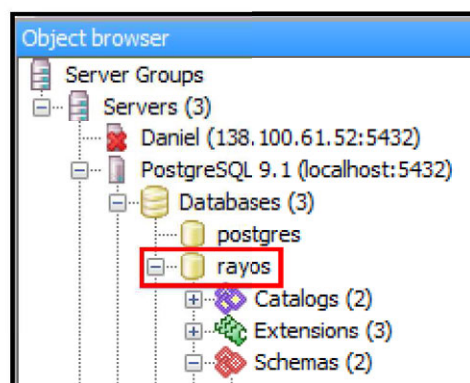
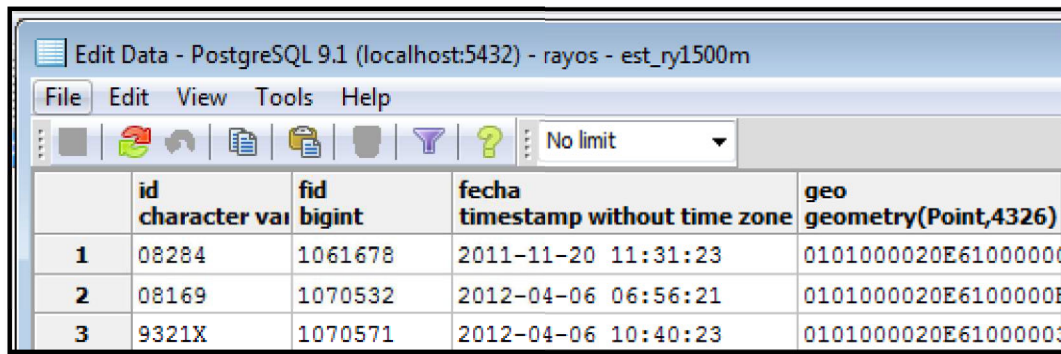


Figura 1. Base de datos creada en PostGIS

Mediante el lenguaje de consulta estructurado (SQL), que permite realizar consultas para obtener de forma sencilla información de una base de datos, se comienza el proceso de selección de la información.

En primer lugar, se desea obtener una tabla con las estaciones que han registrado rayos en un entorno de 1500 m teniendo en cuenta la elipse de error, para no excederse de los límites de error máximos (véase Tabla 1).



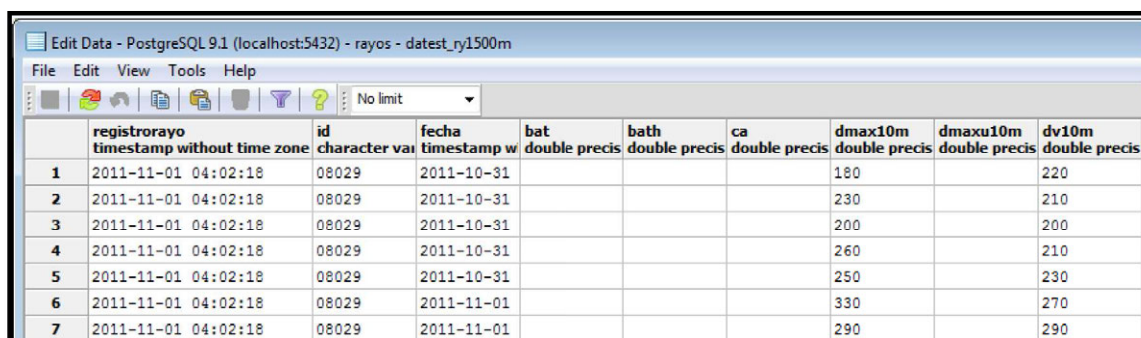
	id character var	fid bigint	fecha timestamp without time zone	geo geometry(Point,4326)
1	08284	1061678	2011-11-20 11:31:23	0101000020E61000000
2	08169	1070532	2012-04-06 06:56:21	0101000020E61000000
3	9321X	1070571	2012-04-06 10:40:23	0101000020E61000000

Tabla 1. Tabla est\_ry1500m creada con SQL

Se crea una nueva tabla con datos de observaciones registradas en aquellas estaciones en las que se han registrado rayos en un entorno de 1500 m.

Puesto que el proceso de gestación de una tormenta hasta llegar al momento climático que coincide con el desencadenamiento de los rayos es un proceso más lento que la disipación, es de gran interés contar con una franja más amplia de evolución previa. Los factores desencadenantes actúan con un tiempo de aproximadamente dos o tres horas antes, pero por tener una referencia general este período se amplía a cinco horas. En la disipación algunas tormentas han desaparecido en una hora después del último rayo, pero para poder tener un margen de seguridad en recoger procesos la franja se amplía a dos horas después de la descarga.

Por el motivo anteriormente explicado se tienen en cuenta toda las observaciones que se hayan registrado en un intervalo de tiempo comprendido 5 horas antes y 2 horas después del registro del impacto del rayo (véase Tabla 2).



	registrorayo timestamp without time zone	id character var	fecha timestamp w	bat double precis	bath double precis	ca double precis	dmax10m double precis	dmaxu10m double precis	dv10m double precis
1	2011-11-01 04:02:18	08029	2011-10-31				180		220
2	2011-11-01 04:02:18	08029	2011-10-31				230		210
3	2011-11-01 04:02:18	08029	2011-10-31				200		200
4	2011-11-01 04:02:18	08029	2011-10-31				260		210
5	2011-11-01 04:02:18	08029	2011-10-31				250		230
6	2011-11-01 04:02:18	08029	2011-11-01				330		270
7	2011-11-01 04:02:18	08029	2011-11-01				290		290

Tabla 2. Tabla datest\_ry1500m creada con SQL

Mediante otra consulta se extrae de la tabla anterior aquella información relacionada con las variables de temperatura y precipitación. Se obtienen para ambas variables la identificación, el registro del rayo y la fecha; para la temperatura los valores de temperatura del suelo y temperatura del aire, y por último los valores de precipitación (véase Tabla 3).



Edit Data - PostgreSQL 9.1 (localhost:5432) - rayos - dat_temp					
	id character var	registrorayo timestamp without time zone	fecha timestamp without time zone	ta double precis	ts double precis
1971	08015	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 14:50:00	32.2	31
1972	08015	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 15:00:00	30.3	29.7
1973	08015	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 15:10:00	29.3	29
1974	08015	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 15:20:00	29.6	28.9

Edit Data - PostgreSQL 9.1 (localhost:5432) - rayos - dat_prec				
	id character var	registrorayo timestamp without time zone	fecha timestamp without time zone	prec double precis
1	0009X	2012-04-06 09:04:26	2012-04-06 06:10:00	0
2	0009X	2012-04-06 09:04:26	2012-04-06 06:20:00	0.2
3	0009X	2012-04-06 09:04:26	2012-04-06 06:30:00	0.2

Tabla 3. Tablas con datos de temperatura y precipitación creadas con SQL

De este modo se recopila información de cada estación por descarga, y se busca mediante otra consulta SQL aquella información correspondiente por cada conjunto de descargas de una misma tormenta (véase Tabla 4). Para ello se considera como tormenta el conjunto de descargas que se produce en un intervalo de una hora.

Edit Data - PostgreSQL 9.1 (localhost:5432) - rayos - dat_temp_tormenta						
	id character var	fecha timestamp without time zone	ta double precis	ts double precis	min timestamp without time zone	max timestamp without time zone
1	08015	2012-06-27 12:00:00	29.9	32.8	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
2	08015	2012-06-27 12:10:00	30.4	33.5	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
3	08015	2012-06-27 12:20:00	31.3	34.3	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
4	08015	2012-06-27 12:30:00	31.8	35.3	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
5	08015	2012-06-27 12:40:00	32.1	35.1	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
6	08015	2012-06-27 12:50:00	32.2	33.6	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
7	08015	2012-06-27 13:00:00	32.2	32.7	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31

Edit Data - PostgreSQL 9.1 (localhost:5432) - rayos - dat_prec_tormenta					
	id character var	fecha timestamp without time zone	prec double precis	min timestamp without time zone	max timestamp without time zone
1	08015	2012-06-27 12:00:00	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
2	08015	2012-06-27 12:10:00	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
3	08015	2012-06-27 12:20:00	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
4	08015	2012-06-27 12:30:00	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
5	08015	2012-06-27 12:40:00	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
6	08015	2012-06-27 12:50:00	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31

Tabla 4. Tablas con datos de temperatura y precipitación para conjuntos de descargas creadas con SQL

### 3.2. Generación de gráficas

Una vez seleccionada la información deseada de los datos en bruto, es interesante representar visualmente la información obtenida para una mejor comprensión. Se opta por trabajar con la herramienta de software matemático *MATrix LABoratory* (MATLAB), que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio.

MATLAB mediante su lenguaje de programación permite la lectura de información de ficheros Excel, por lo que resulta necesaria la conversión de las tablas creadas anteriormente en formato PostgreSQL a formato .csv de Excel (véase Figura 2). Esta conversión se realiza a partir de las utilidades GDAL/OGR que se pueden instalar en Windows usando OSGeo4W. Para ello una vez ejecutado OSGeo4W, desde la consola del sistema se ejecuta la orden *ogr2ogr* con los parámetros necesarios.

```
C:\Users\Alba>ogr2ogr -f "CSV" rayosestudio.csv PG:"host=localhost user=postgres  
dbname= rayos password= " rayosestudio
```

Figura 2. Orden *ogr2ogr* ejecutada desde la consola de OSGeo4W

Las gráficas a representar con la información que contienen estos ficheros son gráficas relacionadas con la temperatura donde se refleja la temperatura del aire y la temperatura del suelo en cada estación por descarga o conjunto de descargas de una misma tormenta, y gráficas de precipitación donde se representa el valor de esta variable en cada estación por descarga o conjunto de descargas de la misma tormenta (véase Anexo 1).

En MATLAB es posible, gracias a su lenguaje propio de programación, tratar con grandes cantidades de información. Desde ficheros .m se accede a la información de los ficheros Excel y se programa para obtener las gráficas correspondientes.

#### 3.2.1. Primera fase

Para comenzar a programar en MATLAB, es necesario estudiar la estructura (filas y columnas) de los datos que contiene el fichero Excel que se ha obtenido desde la consola de OSGeo4W.

##### 3.2.1.1. Programación de temperatura en estaciones por descarga

Después de analizar el fichero Excel obtenido para estaciones en las que se estudia la variable temperatura por descargas, es necesario generar tres ficheros .m desde MATLAB atendiendo a las características oportunas. Los tres ficheros se caracterizan por tratar datos que contienen estaciones con un valor de texto en su identificador (por ejemplo: 0009X), datos que contienen estaciones con identificador numérico y un solo un valor de temperatura (en este caso temperatura del aire), y datos que contienen estaciones con identificador numérico y dos valores de temperatura (temperatura del aire y temperatura del suelo).

Cuando se ejecuta el primer tipo de ficheros, aquellos que contienen estaciones con un valor de texto en su identificador, se pide mediante la entrada de valores por teclado el rango de filas del fichero Excel que se quiere analizar para la gráfica, el identificador de la estación y la fecha del impacto.

El programa accede al Excel y se dirige al rango indicado por el usuario, analiza la columna donde se encuentra el registro horario de ese periodo observado y lo convierte en formato de horas, para poder ser leído por el software. Registra la fecha del impacto de la descarga siguiendo el mismo proceso de conversión anterior, el valor de temperatura que este tipo de ficheros contienen (temperatura del aire) y con esos datos dibuja sobre una gráfica la temperatura.

Los ejes de la gráfica se corresponden por tanto con las horas en formato decimal para el eje de abscisas, y con la temperatura en grados centígrados para el eje de ordenadas. En la gráfica se incluyen el identificador de la estación, la fecha de la descarga, la pendiente en el momento del impacto del rayo y una leyenda indicando la variable que se representa (véase Figura 3).

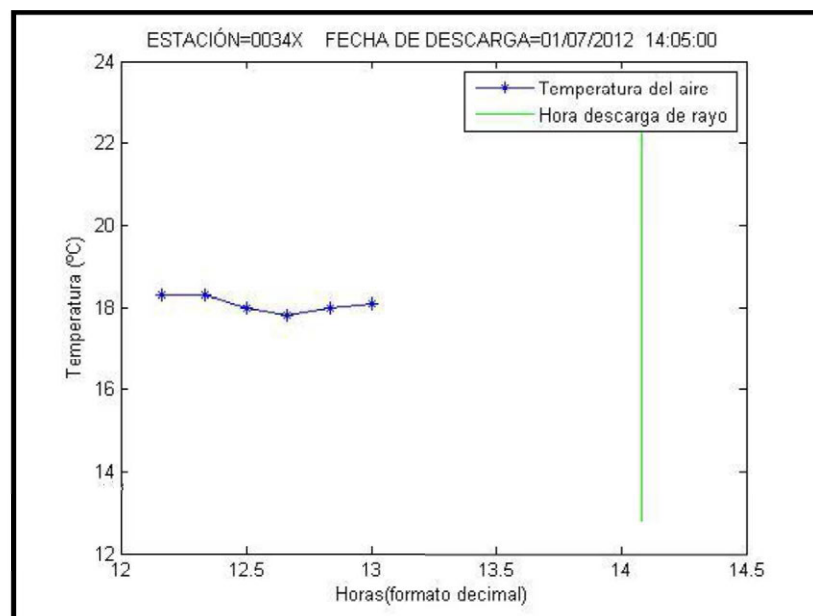


Figura 3. Gráfica de temperatura en estación por descarga con valor de texto en su identificador

Al ejecutar el segundo tipo de ficheros, aquellos que contienen estaciones con valores numéricos en su identificador y un único valor de temperatura, se pide mediante la entrada de valores por teclado los mismos parámetros que en el primer tipo de fichero. El programa sigue el mismo proceso que en el anterior tipo de fichero, registrando la fecha del impacto de la descarga manteniendo el proceso de conversión a horas, el valor de temperatura que este tipo de ficheros contienen (temperatura del aire) y con esos datos dibuja sobre una gráfica la temperatura.

Los ejes de la gráfica se mantienen igual que en el primer tipo de fichero, y en la gráfica se incluyen el identificador de la estación, la fecha de la descarga, la

pendiente en el momento del impacto del rayo y una leyenda indicando la temperatura del aire y el impacto del rayo (véase Figura 4).

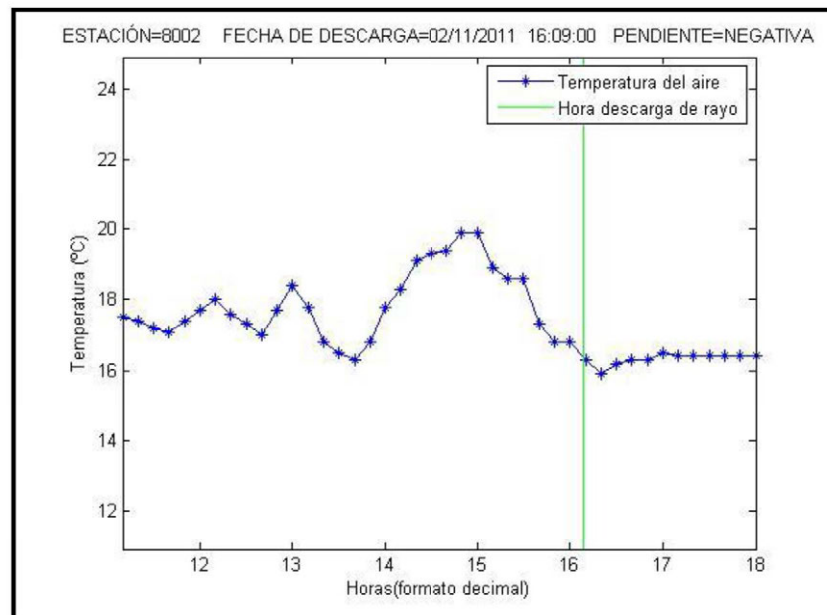


Figura 4. Gráfica de temperatura en estación por descarga con valor numérico en su identificador y una única variable (temperatura del aire)

Por último, en el tercer tipo de ficheros, aquellos que contienen estaciones con valores numéricos en su identificador con dos valores de temperatura a representar, se pide mediante la entrada de valores por teclado los mismos parámetros que en el primer y segundo tipo de ficheros. El programa sigue el mismo proceso, accede al Excel y se dirige al rango indicado por el usuario, analiza la columna donde se encuentra el registro horario de ese periodo observado y lo convierte en formato de horas, para poder ser leído por el software. Registra la fecha del impacto de la descarga siguiendo el mismo proceso de conversión, el valor de temperatura del aire y la temperatura del suelo, y finalmente con esos datos dibuja la gráfica.

Los ejes de la gráfica se mantienen y además se incluyen en la gráfica el identificador de la estación, la fecha de la descarga, la pendiente en el momento del impacto del rayo y una leyenda indicando las variables representadas (véase Figura 5).



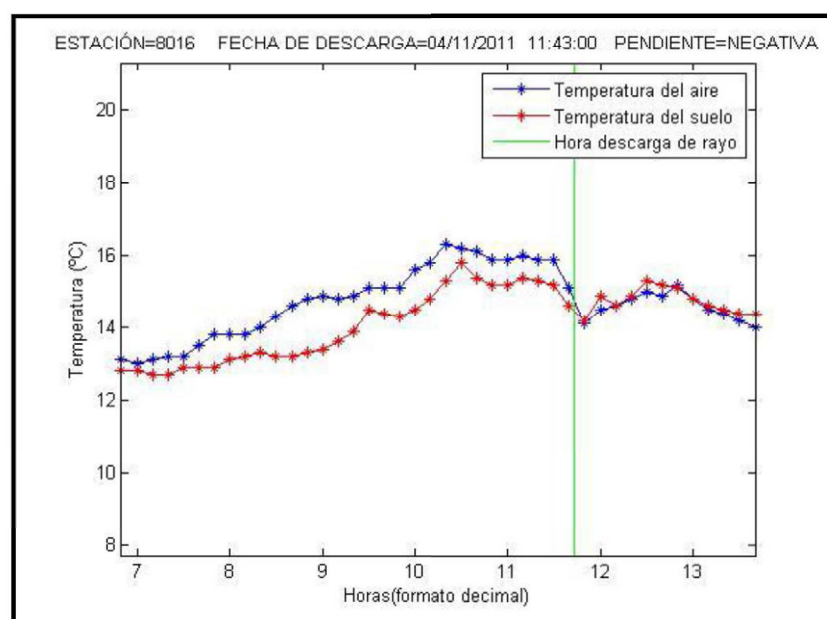


Figura 5. Gráfica de temperatura en estación por descarga con valor numérico en su identificador y dos variables (temperatura del aire y temperatura del suelo)

### 3.2.1.2. Programación de temperatura en estación por conjunto de descargas

Para seguir el mismo proceso que en el apartado anterior, se analiza el fichero Excel obtenido para estaciones en la que se estudia la variable temperatura por conjunto de descargas, clasificado como una misma tormenta, y se generan otros tres ficheros .m desde MATLAB. Los ficheros mantienen las características vistas anteriormente, atendiendo al nombre de la identificación de la estación y el número de variables contenidas.

Al ejecutar el primer tipo de ficheros, aquellos que contienen estaciones con un valor de texto en su identificador, se exige mediante la entrada de valores por teclado, a diferencia de los casos anteriores, únicamente el rango de filas del fichero Excel que se quiere analizar para la gráfica. El programa continúa el mismo proceso que se explica en el apartado 3.2.1.1 hasta llegar a dibujar la gráfica de iguales condiciones (véase Figura 6).

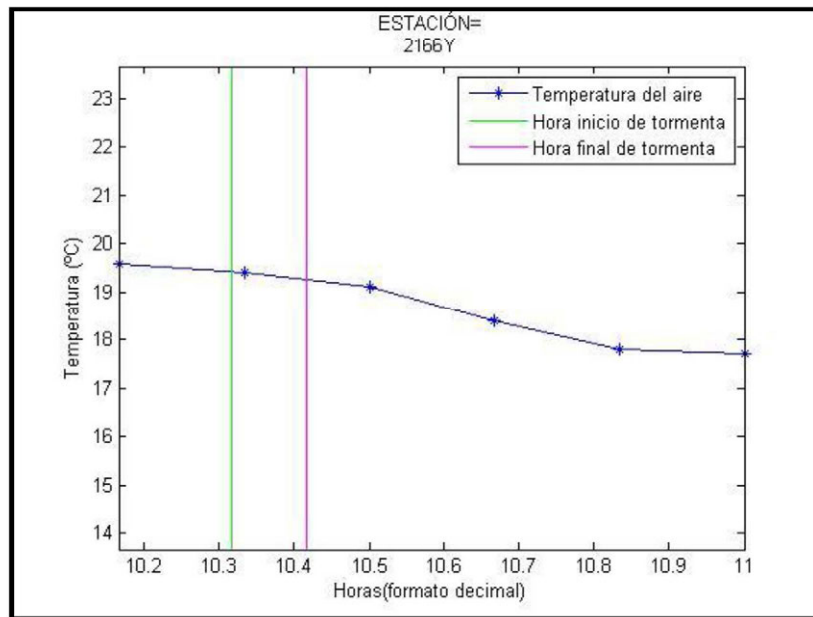


Figura 6. Gráfica de temperatura en estación por conjunto de descargas con valor de texto en su identificador

Cuando se ejecuta el segundo tipo de ficheros, aquellos que contienen estaciones con valores numéricos en su identificador y un único valor de temperatura, se introduce mediante la entrada de valores por teclado los parámetros del rango de filas del fichero Excel que se quiere analizar y el identificador de la estación. El programa sigue el mismo proceso que en el anterior tipo de fichero obteniendo una gráfica similar (véase Figura 7).

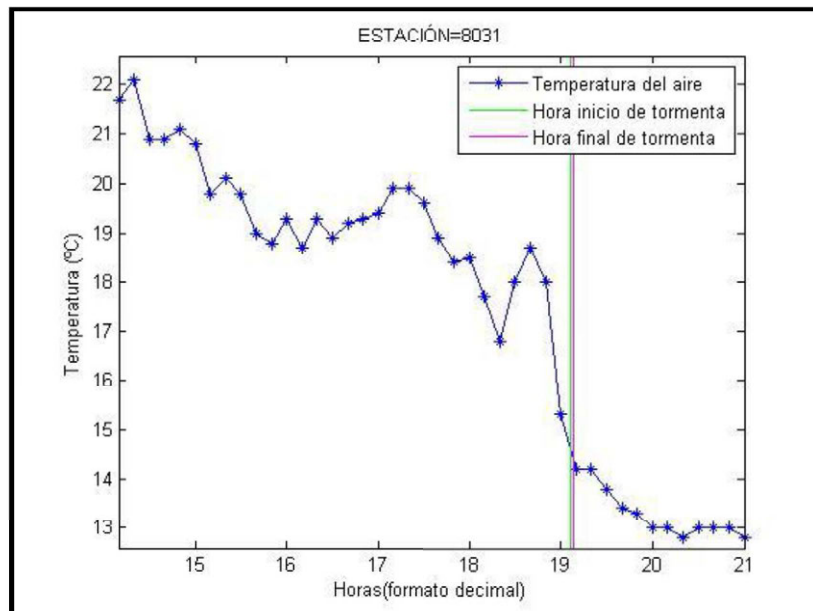


Figura 7. Gráfica de temperatura en estación por conjunto de descargas con valor numérico en su identificador y una única variable (temperatura del aire)

Al ejecutar el último tipo de ficheros, aquellos que contienen estaciones con valores numéricos en su identificador con dos valores de temperatura a representar, se introduce mediante la entrada de valores por teclado los mismos parámetros que en el segundo tipo de ficheros. El programa sigue su curso habitual hasta dibujar la gráfica correspondiente (véase Figura 8).

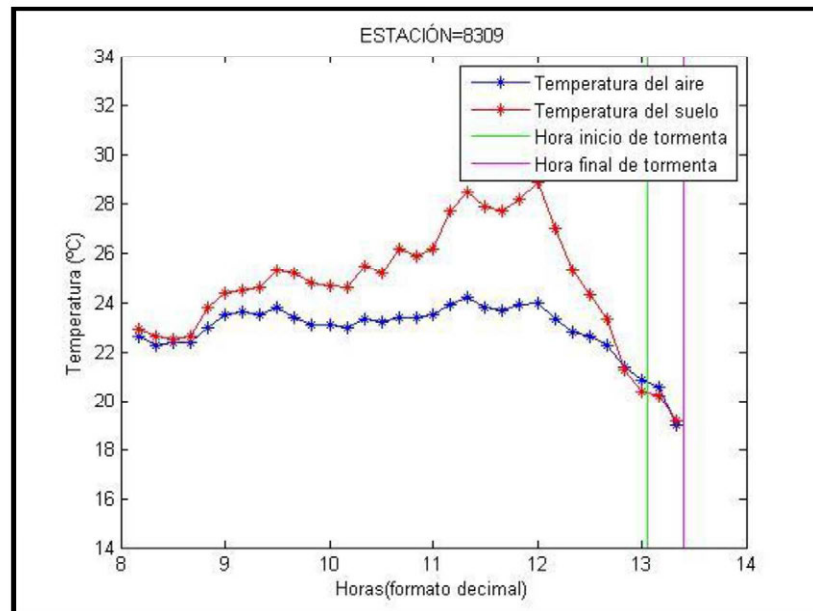


Figura 8. Gráfica de temperatura en estación por conjunto de descargas con valor numérico en su identificador y dos variables (temperatura del aire y temperatura del suelo)

### 3.2.1.3. Programación de precipitación en estación por descarga

Del mismo modo que se ha trabajado para la variable de temperatura, se trabaja en la variable de precipitación. Se estudia el fichero Excel para conocer su forma (filas y columnas) y se generan desde MATLAB, en este caso, dos ficheros .m que servirán para programar la creación de gráficas que incluyen la variable citada en cada estación por descarga producida. Estos ficheros se caracterizan por incluir valor de texto o valor numérico en el identificador de las estaciones.

El programa sigue la misma estructura que los anteriores ejemplos para la variable de temperatura (tanto en el primer tipo de fichero como en el segundo), acceden al fichero Excel para leer el rango dado por el usuario, piden el identificador y la fecha de la descarga para terminar dibujando la gráfica de precipitación (véase Figura 9).



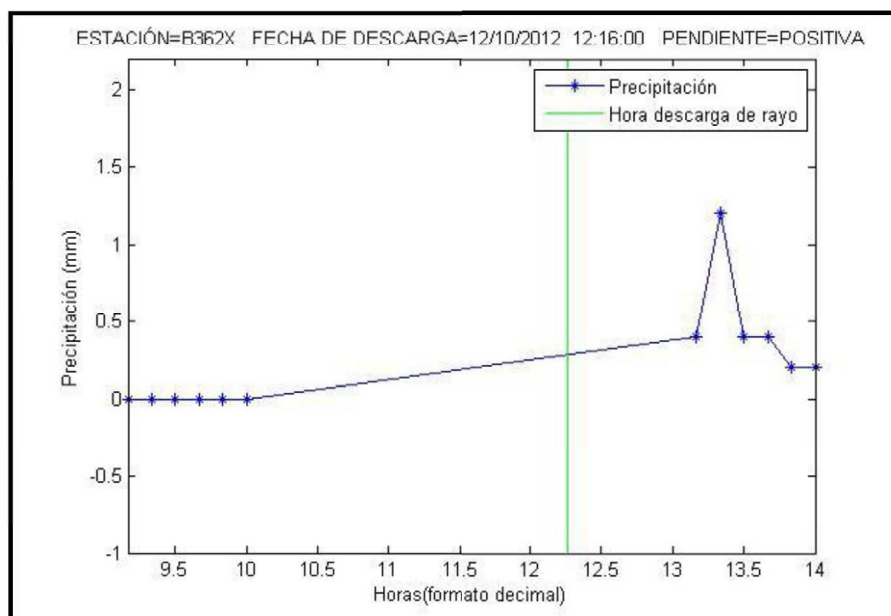


Figura 9. Gráfica de precipitación en estación por descarga con valor de tipo texto en su identificador

#### 3.2.1.4. Programación de precipitación en estación por conjunto de descargas

Al igual que ocurre en el apartado 3.2.1.3 se estudia el fichero Excel para conocer su forma y se generan desde MATLAB dos ficheros *.m*, caracterizados por incluir valor de texto o valor numérico en el identificador de las estaciones.

El programa sigue la misma estructura que en el apartado anterior para los dos tipos de ficheros, accede al fichero Excel para leer el rango dado por el usuario, solicita los parámetros oportunos y dibuja la gráfica de precipitación (véase Figura 10).

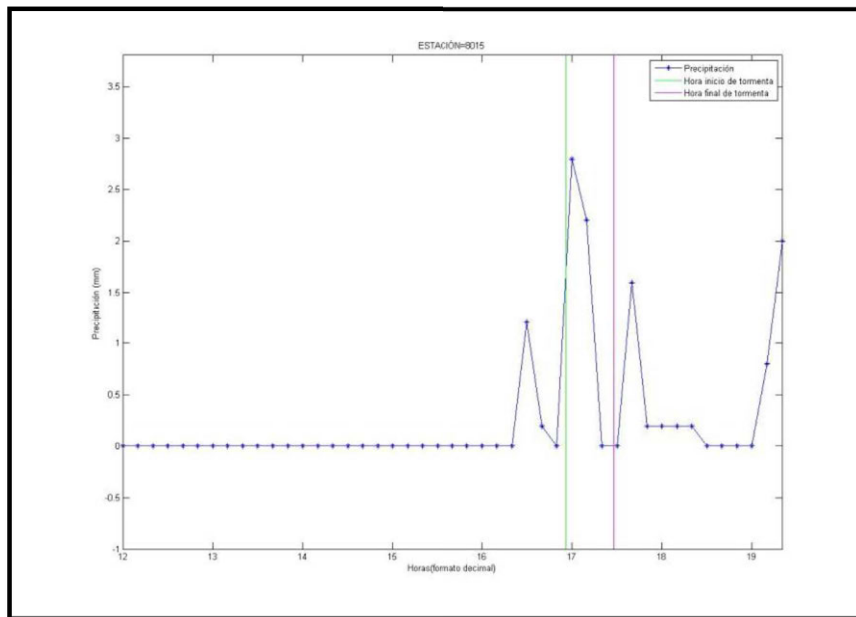


Figura 10. Gráfica de precipitación en estación por conjunto de descargas

### 3.2.2. Segunda fase

Una vez terminadas y revisadas todas las gráficas, se deben corregir los posibles errores existentes en éstas. Puesto que todas ellas no respetan el mismo tamaño o diferencia de unidades en los ejes que representan las variables (eje de ordenadas), y para poder comparar unas gráficas con otras a la hora de hacer el estudio, es necesario solventar este problema.

En todos los ficheros *.m* creados anteriormente se modifica la parte del programa donde se especifica el tamaño de ejes de las gráficas, para poder mantener el mismo intervalo de unidades. Por ejemplo en el caso de gráficas de temperatura el rango de valores tiene como límite un intervalo de 10 °C (véase Figura 11).

Además en este segundo período de programación, se considera de poca importancia analizar en el estudio aquellas gráficas en las que la descarga del rayo se produce fuera del intervalo de valores observados en la estación (véase Figura 3), por lo que se eliminan las gráficas de este tipo.

Por último, para mejorar el futuro estudio de las gráficas, es apropiado clasificarlas atendiendo al horario de la descarga. Se agrupan en gráficas de mañana aquellas en las que el rango horario del eje de las ordenadas está comprendido entre las 07:01h y las 15:00h, en gráficas de tarde aquellas en las que el rango horario varía entre las 15:01h y las 23:00h, y finalmente en gráficas de noche aquellas en las que el rango abarca de las 23:01h a las 07:00h.

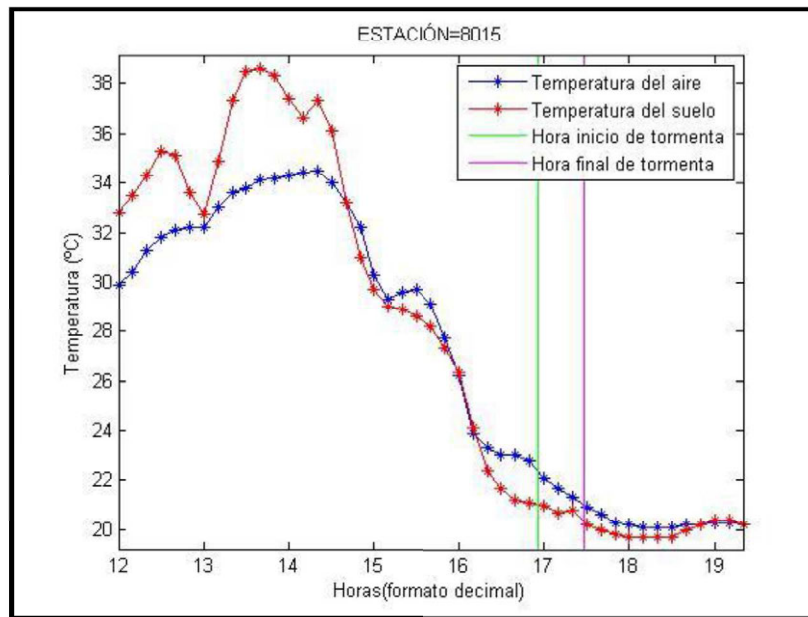


Figura 11. Gráfica de temperatura en estación por conjunto de descargas con el eje de ordenadas corregido (10 unidades)

### 3.2.3. Tercera fase

En este período de programación, se llega a la conclusión de que los valores de precipitación se deben representar unidos a los valores de temperatura, para ver posibles relaciones entre ambas variables. Se determina el histograma como la mejor opción para representar gráficamente la variable de precipitación, y además se decide que los histogramas aparezcan debajo de las gráficas creadas para la temperatura, haciendo coincidir el eje de abscisas (horario de los registros) de ambas representaciones.

Manteniendo la clasificación por horario establecido en el apartado 3.2.2, se adjuntan a los ficheros *.m* de temperatura el código de programación correspondiente para la creación de los histogramas que representan la variable de precipitación. Para ello es necesario generar seis ficheros en MATLAB atendiendo a las características del fichero Excel con los datos de origen.

Teniendo en cuenta tanto los registros en estaciones por descarga, como los registros en estaciones por conjunto de descargas, estos seis ficheros se caracterizan por tratar datos que contienen estaciones con algún valor de texto en su identificador, datos que contienen estaciones con identificador numérico y si tienen más de un valor de su variable a estudiar, como ocurre con la temperatura (temperatura del aire y temperatura del suelo).

El programa, en la parte correspondiente al histograma, solicita al usuario el rango de valores a tratar para acceder al fichero Excel y proceder a su lectura. Analiza los datos temporales correspondientes al registro y la variable registrada (precipitación).

Para dibujar las barras correspondientes a los valores de precipitación registrados en esa estación, el programa entra en un bucle y va asignando los valores numéricos -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5 o 6 correspondientes a una clasificación de cantidad de precipitación (véase Tabla 5).

Clasificación precipitación	Cantidad de agua registrada (mm)
-1	No existe registro
0	0
1	0 – 1,25
2	1,25 – 2,5
3	2,5 – 5
4	5 – 10
5	10 – 20
6	20 – 40

Tabla 5. Clasificación en función de la cantidad de precipitación registrada en mm

Una vez finalizada la asignación de un valor numérico a la variable, el programa dibuja el histograma con los ejes correspondientes añadiendo una leyenda explicativa de la clasificación (véase Figura 12).

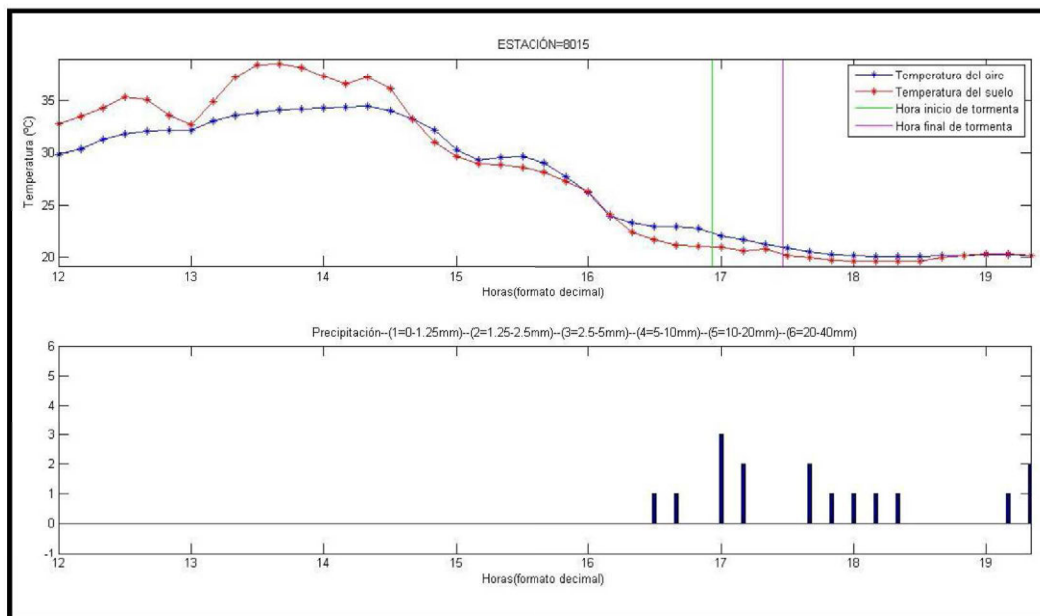


Figura 12. Gráfica de temperatura en estación por conjunto de descargas e histograma de precipitación

### 3.2.4. Cuarta fase

En el último período de programación se pretende mejorar errores que se han detectado en el anterior período en cuanto a los histogramas, entre ellos nos encontramos con que las barras de éstos no son correctas visualmente, la continuidad de éstas haría un histograma más comprensible (los histogramas del apartado 3.2.3 reflejan que entre dato y dato representado ha habido un parón de registro cuando no es así). Además se debería de eliminar del eje de ordenadas la clasificación -1 (no existe registro de precipitación), puesto que tras analizar los histogramas ya creados no existe ningún registro de este estilo (véase Figura 13).

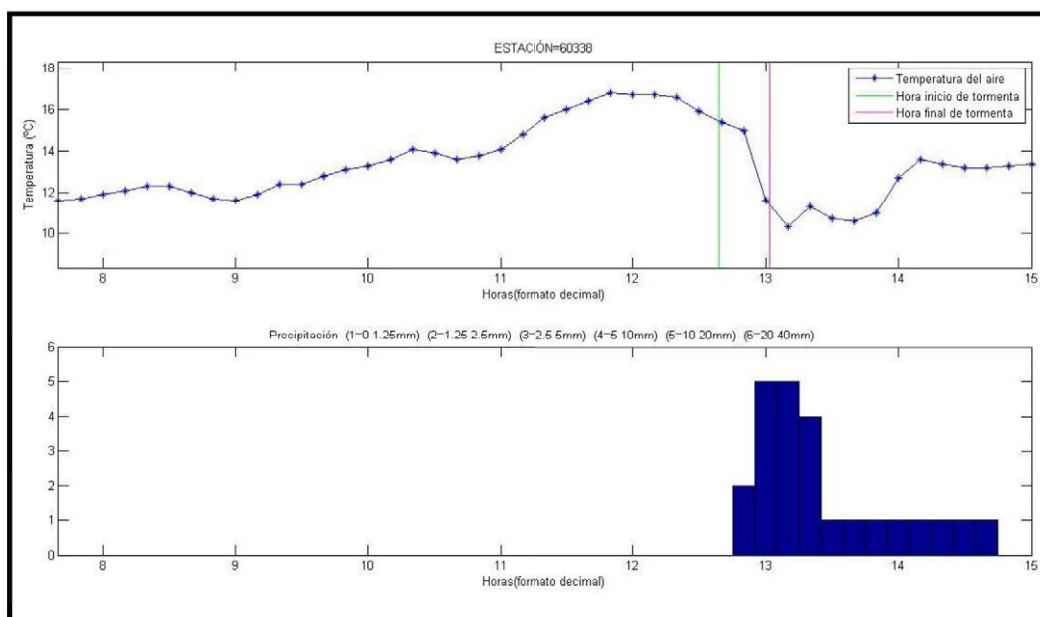


Figura 13. Gráfica de temperatura en estación por conjunto de descargas con temperatura del aire e histograma de precipitación corregido

Se reclasifican las gráficas, ya que en la clasificación que se ha realizado en la selección de datos desde PostGIS (por un lado se han obtenido datos de estaciones por descarga y por otro estaciones con conjunto de descargas) del apartado 3.1 se ha producido un error. En aquellos datos que se han obtenido como descargas individuales por estación, se detectan para una misma estación registros temporales muy continuos, que se deberían de considerar como conjunto o familia de rayos por pertenecer a la misma tormenta.

Finalmente se realiza la última clasificación de las gráficas corregidas para el futuro estudio, clasificándolas en tres tipos de gráficas:

- Buenas: aquellas en las que la descarga del rayo o tormenta están dentro de los datos registrados y éstos mantienen continuidad de registro (véase Figura 5).

- Regulares: aquellas en las que la descarga del rayo o tormenta se encuentran dentro de los datos registrados pero existe un parón de registro (véase Figura 14).
- Malas: aquellas en las que la descarga del rayo o tormenta se han representado en una parón de registro (véase Figura 3).

Son excluidas del estudio aquellas gráficas clasificadas como malas, puesto que no servirán para sacar conclusiones de la relación entre las descargas y las variables a estudiar.

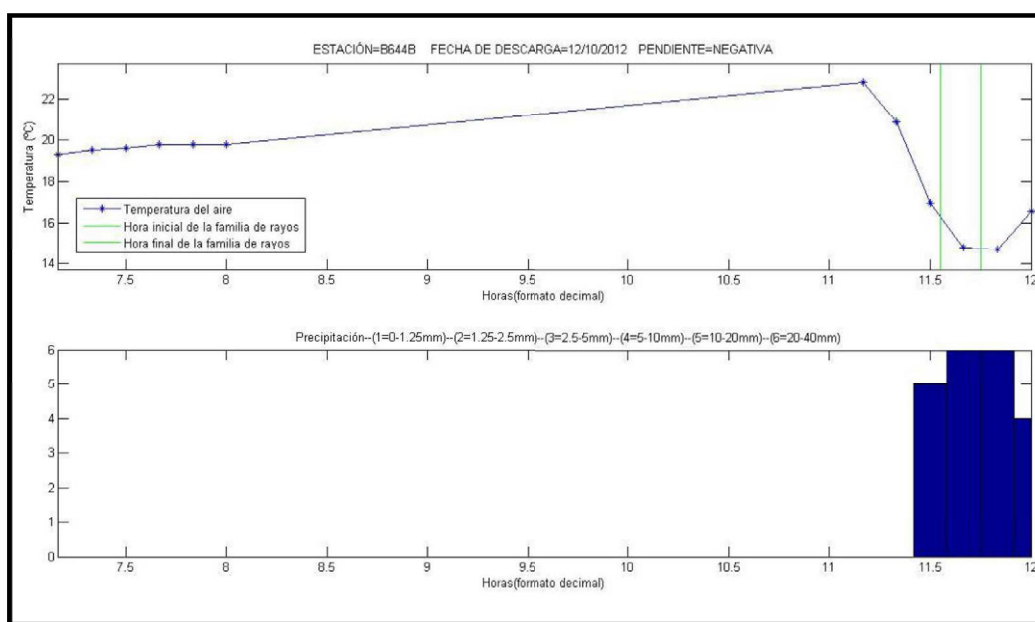


Figura 14. Gráfica de temperatura en estación por descarga con parón de registro e histograma de precipitación



#### 4. Interpretación de los datos obtenidos

Una vez finalizadas las gráficas que facilitan la lectura y comprensión de los datos de las variables de temperatura y precipitación, se selecciona la extensión o zonas del territorio español donde se va a interpolar para realizar el estudio de la relación de causalidad entre la descarga eléctrica y estas variables.

Estas zonas son definidas por grupos de estaciones de AEMET dentro de la península, y lo forman los siguientes sectores:

- Sector costero
  - a. Llano (sin consideración del relieve) → zona de *Matalascañas*, *Marismas* (véase Figura 15)



Figura 15. Sector costero llano, selección zona de Matalascañas

- b. Montuoso de barlovento → zona de *Cudillero*, *Litoral asturiano* (véase Figura 16)



Figura 16. Sector costero montañoso barlovento, selección zona de Cudillero



c. Montuoso de sotavento → zona de *Dalías, Costa almeriense* (véase Figura 17)



Figura 17. Sector costero montañoso sotavento, selección zona de *Dalías*

• Sector Interior

a. Llano (sin consideración del relieve)

i. Secanos → zona de *Alcázar de San Juan, La Mancha* (véase Figura 18)



Figura 18. Sector interior llano seco, selección zona de *Alcázar de San Juan*

ii. Regadíos → zona de *Lleida, Pla de Lleida* (véase Figura 19)



Figura 19. Sector interior llano regadío, selección zona de *Lleida*

b. Montuoso

i. Sector con estaciones a sotavento → zona de *Riaño, Cordillera Cantábrica Sur* (véase Figura 20)



Figura 20. Sector interior montañoso sotavento, selección zona de Riaño

ii. Sector con estaciones a barlovento → zona de *Ubrique, Sierra de Grazalema* (véase Figura 21)



Figura 21. Sector interior montañoso barlovento, selección zona de Ubrique

iii. Sector con estaciones de dos vertientes → zona de *Navacerrada, Sistema Central* (véase Figura 22)



Figura 22. Sector interior montañoso de dos vertientes, selección zona de Navacerrada

Estas zonas han sido elegidas para poder considerar el diferente comportamiento de la interpolación ante la variable relieve (llano/montuoso) , la influencia del efecto barrera que genera el relieve (barlovento/sotavento/culminación)

ante la variable efecto de la humedad (litoral/interior) respecto a los datos climáticos disponibles.

Las zonas tienen un tamaño aproximado de 30 km de radio alrededor del punto tomado como centro de la zona, para ello se define más o menos zonas circulares con un diámetro de aproximadamente 60 km. Por si la zona seleccionada fuese escasa en cuanto a estaciones para interpolar, se selecciona también zonas circulares con un diámetro de aproximadamente 100 km con el mismo centro establecido para las zonas de 60 km. En cada subzona es necesario elegir un 85% de las estaciones AEMET, dejando las restantes para comprobar los datos de interpolación obtenidos.

Además de establecer estas zonas, es necesario indicar unas fechas concretas para la interpolación. Tras estudiar los datos brutos y las gráficas obtenidas, se consideran las mejores fechas para interpolar aquellas que cumplen con ciertos requisitos meteorológicos (véase Tabla 7).

Los requisitos meteorológicos que se han considerado para seleccionar las fechas reflejan situaciones extremas, no como medias, sino que se corresponden además con una situación real. La selección se ha realizado sobre el calendario diario de situaciones durante el año climático.

Por otra parte se ha procurado que estuviesen repartidas lo más equitativamente a lo largo del año, y para ello se ha escogido una distribución donde las cuatro estaciones son prácticamente equidistantes en tiempo.

Situación meteorológica	Fecha para interpolar
Alta presión	26 de septiembre del 2011 → (2011-09-26)
	16 de diciembre del 2011 → (2011-12-16)
	26 de marzo del 2012 → (2012-03-26)
	26 de junio del 2012 → (2012-06-26)
Baja presión	25 de octubre del 2011 → (2011-10-25)
	15 de enero del 2012 → (2012-01-15)
	30 de abril del 2012 → (2012-04-30)
	26 de julio del 2012 → (2012-07-26)
Frío extremo	12 de febrero del 2012 → (2012-02-12)
Calor extremo	10 de agosto del 2012 → (2012-08-10)

Tabla 6. Fechas para interpolar en función de la situación meteorológica

Con las zonas y fechas a interpolar seleccionadas, se debe comprobar la bondad de los métodos de interpolación con los datos de las estaciones que no hayan sido usadas en el proceso.



## 5. Selección de los métodos de interpolación

### 5.1. Estado del arte

La interpolación espacial es un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio conociendo valores de esa variable en otras posiciones del espacio (Bosque, 2000). Puede utilizarse para predecir valores desconocidos de cualquier dato de un punto geográfico, tales como la temperatura o la precipitación. La interpolación se basa en la correlación espacial de los objetos distribuidos espacialmente, de manera que los puntos que estén más cerca del punto a predecir tienden a tener características similares.

Los métodos de interpolación espacial se clasifican en dos categorías: determinísticos y probabilísticos. Los métodos de interpolación determinísticos son aquellos que crean superficies continuas utilizando características geométricas de las observaciones, como el inverso de la distancia (*Inverse Distance Weighting Averaging*, IDWA) o la regresión lineal. Y los métodos probabilísticos son aquellos que utilizan el concepto de aleatoriedad, en esta categoría se encuentran los métodos geoestadísticos derivados del *Kriging*, como es el caso del *co-kriging*. Además estos métodos son descritos como técnicas globales, que ajustan un modelo a través de la variable a predecir en todos los puntos del área de estudio (IDWA), o técnicas locales que estiman valores para un punto no testeado de un número específico de puntos vecinos (*Thin plate smoothing splines*).

La mayoría de las técnicas de interpolación dan resultados similares cuando los datos son abundantes (Burrough y McDonnell, 1998), pero en realidad no existe un método general adecuado para interpolar todas las variables, ya que la precisión de la medición, la densidad de los datos, su distribución y su variabilidad espacial influyen para la exactitud de la interpolación. Frecuentemente se usan para la variable de temperatura los métodos de *thin plate smoothing splines*, *co-kriging* (utilizando una variable auxiliar) e IDWA, siendo los dos primeros los más comunes. Para el caso de la variable climática de precipitación, se utilizan los métodos de IDWA y *co-kriging* utilizando para éste último una variable auxiliar como puede ser un modelo digital de elevaciones (DEM).

### 5.2. Métodos de interpolación

#### 5.2.1. Inverso de la distancia (IDWA)

El IDWA es un método de interpolación que estima los valores de las celdas calculando una combinación lineal de los valores de muestreo de los puntos conocidos. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más

influencia o peso tendrá en el proceso del cálculo, por ello se dice que la ponderación de este método se basa en la función de la distancia.

Los interpoladores de IDWA son de la forma:

$$\hat{y}(X) = \sum \lambda_i y(X_i)$$

donde:

$\lambda_i$  = los pesos de las distintas localizaciones

$y(X_i)$  = variables evaluadas en la observación

La suma de los pesos es igual a uno, y éstos se asignan inversamente proporcionales a la distancia entre la muestra y la predicción. Por lo tanto, cuanto existen gran distancia entre los puntos de muestra y los de predicción, el peso más pequeño se asigna al valor de la muestra.

### 5.2.2. Thin plate smoothing splines

Las técnicas de *splines* pueden ser usados para interpolaciones exactas o para “suavizar”. Se presenta un modelo para *thin plate smoothing splines* parciales (Hutchinson, 1991) con dos variables independientes:

$$q_i = f(x_i, y_i) + \sum_{j=1}^p \beta_j \Psi_{ij} + \varepsilon_i (i = 1, \dots, n)$$

donde:

$f(x_i, y_i)$  = Función suavizada desconocida

$\beta_j$  = Conjunto de parámetros desconocido

$x_i, y_i, \Psi_{ij}$  = Variables independientes

$\varepsilon_i$  = errores independientes con media cero y varianza  $d_i \sigma^2$

$d_i$  = pesos conocidos

La función de suavizado  $f$  y los parámetros  $\beta_j$  son estimados por reducir al mínimo:

$$\sum_{i=1}^n [(q_i - f(x_i, y_i) - \sum_{j=1}^p \beta_j \Psi_{ij}) / d_i]^2 + \lambda J_m(f)$$

donde:

$J_m(f)$  = medida de suavizado de  $f$

$\lambda$  = número positivo denominado parámetro de suavizado, calculado mediante la reducción al mínimo de la función de validación cruzada generalizada

El método de interpolación se considera fuerte, puesto que el método de la reducción al mínimo de la validación cruzada aborda directamente a la exactitud predictiva y depende menos de la veracidad del modelo estadístico básico (Hutchinson, 1995). Su principal ventaja sobre otras técnicas geoestadísticas es que no requiere estimación previa de la estructura espacial de la covarianza.

### 5.2.3. Co-kriging

Este método es una extensión natural del *kriging* y permite mejorar la estimación de una variable principal con pocos puntos usando una variable secundaria con mayor cantidad de información y que además esté correlacionada con la principal. En este método permite la utilización del semivariograma o variograma cruzado para representar la varianza de una de las variables empleada respecto a la otra, este tipo de información puede usarse para predecir la variable principal.

La combinación de los pesos en este método puede cambiar en función de la distribución espacial de las muestras. La combinación lineal de los pesos es de la forma:

$$\sum \lambda_i y_i$$

donde:

$y_i$  = variables evaluadas en la observación

$\lambda_i$  = pesos de *kriging*

El *co-kriging* también proporciona una medida del error o incertidumbre de la superficie estimada. Para aplicar este método, se necesita un modelo de relación entre la variable a predecir y la covariable. Esto se realiza mediante un modelo a través del variograma cruzado, que se lleva a cabo de forma similar a las estimaciones del semi-variograma:

$$y_{1,2}(h) = \frac{1}{2} E ((y_1(x) - y_1(x+h))(y_2(x) - y_2(x+h)))$$

Para obtener una buena precisión, el semivariograma y el variograma cruzado deben cumplir la siguiente relación y mantenerse en todo  $h$ :

$$y_{1,2}(h) \leq \sqrt{y_1(h)y_2(h)}$$

El éxito de este método se consigue cuando el número de covariables es más alto que la variable de interés, y cuando la correlación espacial entre variables y covariables es alta.

#### 5.2.4. Regresión múltiple

El objetivo de éste método es obtener una función extendida a todo el ámbito de estudio que proporcione el valor de una variable dependiente “ $Y$ ” obtenida a partir de la combinación lineal de “ $N$ ” coeficientes “ $a_j$ ” de una serie de variables “ $x_j$ ” independientes:

$$Y = a_0 + \sum_{j=1}^N a_j * x_j$$

Debe tenerse en cuenta que, a diferencia de un *software* estadístico, desde un punto de vista SIG los datos correspondientes a las variables independientes no son únicamente unas columnas de valores, son esencialmente un modelo digital de terreno (MDT) como conjunto de datos numéricos que describen la distribución espacial de una característica del territorio (Pesquer, 2008).



## 6. Aplicación de la interpolación


Para comenzar con la fase de interpolación, antes de aplicar los métodos seleccionados es necesario realizar algunas tareas para preparar los datos con los que se va a trabajar.

### 6.1. Tratamiento de los datos

#### 6.1.1. Selección de zonas geográficas

En primer lugar, se debe seleccionar espacialmente las zonas especificadas en el apartado 4. Para ello desde la plataforma de ArcGIS y sobre la capa AEMET se seleccionarán las zonas citadas.

Una vez cargada la capa AEMET es necesario modificar la proyección cartográfica, se debe convertir el sistema de coordenadas geográficas de origen WGS84 al sistema de coordenadas proyectadas UTM30N, de este modo se evitan posibles errores en la selección del área de influencia de cada zona. Las coordenadas de longitud y latitud se convierten en coordenadas x e y en la proyección plana.

Desde la función  **Define Projection** de AcrMap se modifica la proyección de la capa AEMET, quedando lista para comenzar con la selección.

Para seleccionar cada una de las zonas especificadas se busca sobre esta capa la estación más cercana a la zona, mirando los atributos de cada estación se accede al nombre y por tanto a su localización. Una vez detectada la estación más cercana a la zona deseada, se debe establecer en torno a ese punto dos áreas de influencia de 60 km y 100 km de radio. Mediante la función *Vectorial/herramientas de geoprocso/buffer* en QuantumGIS se puede establecer las distintas áreas de influencia sobre la capa AEMET para todas las zonas establecidas en el apartado 4, la capa trabajada toma el siguiente aspecto (véase figura 23).

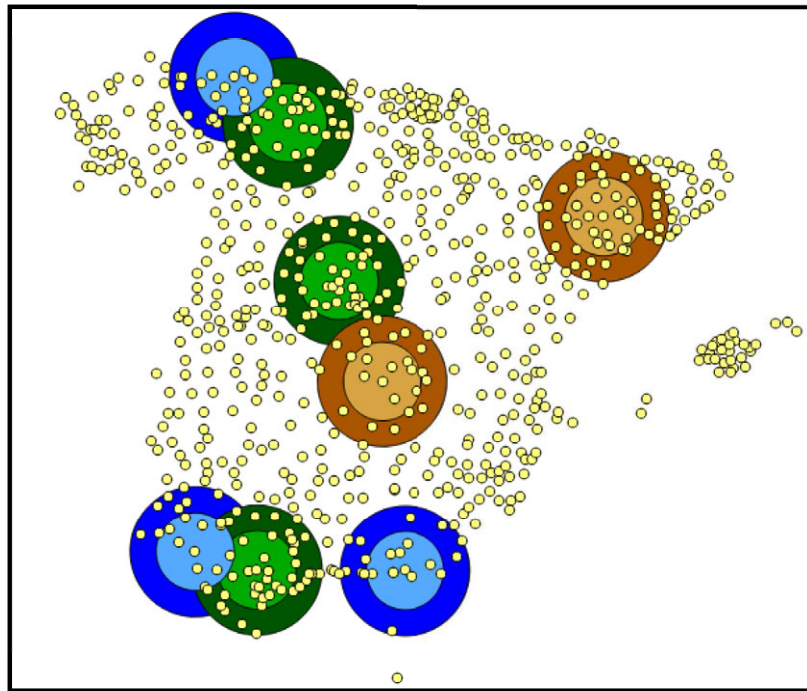


Figura 23. Zonas de influencia para la interpolación sobre capa AEMET con coordenadas proyectadas

Las tres áreas de influencia representadas con el color azul se corresponden con las zonas consideradas como zonas costeras, clasificándose en subzonas de llano, costa barlovento y costa sotavento. Aquellas representadas con color marrón hacen referencia a la zona de interior, con clasificación por subzonas de regadío y seco. Por último, las zonas representadas en color verde se corresponden con las zonas montañosas con clasificación en subzonas de montañoso barlovento, montañoso sotavento y montañoso a dos vertientes.

Una vez realizadas las áreas de influencia, se debe establecer la intersección de las estaciones de la capa AEMET con éstas, gracias a la herramienta *Vectorial/herramientas de geoprocso/intersección* se permite realizar esta operación. De este modo se obtienen capas *shape* con las zonas de influencia en función de las áreas generadas a 60 km y a 100 km de radio para cada zona establecida (véase Figura 24).

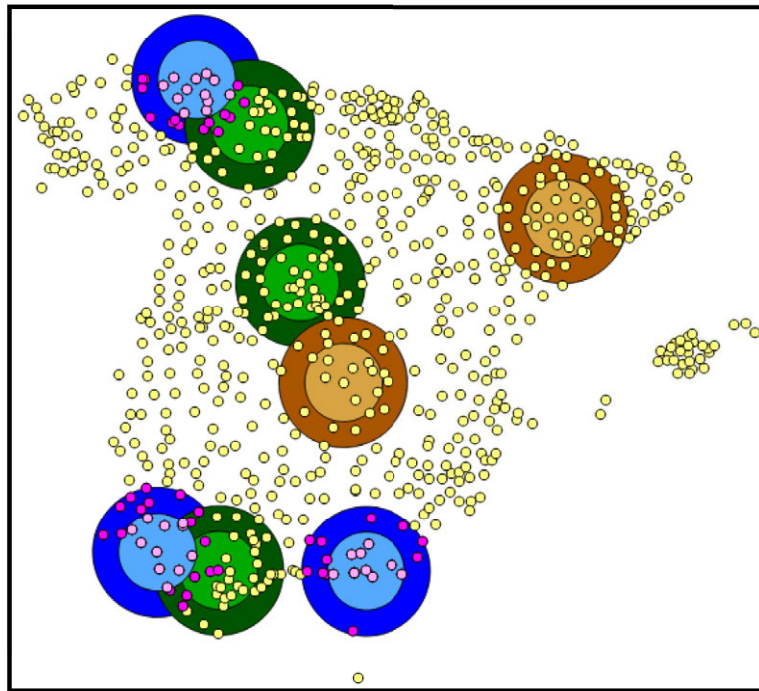


Figura 24. Áreas de influencia con 60 y 100 km de diámetro sobre las zonas costeras en color rosa claro y oscuro respectivamente

#### 6.1.2. Selección de los datos de las variables a interpolar

Una vez obtenidas las capas *shape* de las zonas a interpolar es necesario obtener de los datos en bruto cierta información, concretamente la geometría, el nombre de la estación, la provincia de ésta o su identificador. Esta información debe corresponderse con las fechas citadas en el apartado 4, consideradas como fechas adecuadas para la interpolación. Para ello, desde consultas SQL en PostGIS, se selecciona la información deseada y se introduce en unas tablas que se crean al mismo tiempo.

Puesto que las horas a interpolar deben de ser cercanas a las 06:00 h y a las 14:00 h, se especifica en la consulta que los datos solicitados de la tabla “obs” deben de estar comprendidos entre las 05:00 h y 07:00h para el primer turno de interpolaciones, y entre las 13:00 h y las 15:00 h para el segundo turno de interpolaciones (véase Figura 25). De este modo se aumenta el rango horario para evitar encontrar registros vacíos a las horas de interpolación deseadas (06:00 h y 14:00 h).

```
create table costa_Blv100_APr_110926 as
select O.*, N.geom, N.z, N.nombre, N.provincia,
N.id_1 as Est_centro FROM OBS O, costa_blv100 as N
where O.id=N.id and
( (fecha>'2011-09-26 5:00:00' and fecha<'2011-09-26 7:10:00')
OR (fecha>'2011-09-26 13:00:00' and fecha<'2011-09-26 15:10:00'));
```

Figura 25. Consulta SQL para obtener la información para interpolar en tablas

Este proceso se repite para cada zona y para cada área de influencia, de manera que se obtienen 160 tablas con su correspondiente información. Estas tablas son nombradas con la siguiente nomenclatura (véase primera línea de la Figura 25):

zona\_subzonaDiámetro\_situaciónMeteorológica\_fecha

Estas tablas que se almacenan en la base de datos de PostGIS deben de exportarse a ficheros *shape*, para ello desde la conexión a PostGIS que establece Quantum GIS es posible acceder a las tablas y exportarlas a este formato.

## 6.2. Descarga de datos complementarios (CNIG)

Para algunos métodos de interpolación es necesaria la utilización de algunas variables auxiliares, en este trabajo se ha optado por la utilización de modelos digitales de elevaciones (MDE) que serán de gran utilidad en la correlación entre las variables conocidas y las variables a predecir.

Gracias al servicio de descargas que ofrece el sitio web del [Centro Nacional de Información Geográfica \(CNIG\)](http://www.cnig.es) se puede acceder gratuitamente a gran cantidad de información geográfica digital generada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Para poder acceder a la información solo es necesario la creación de un usuario a través del cual se permite el acceso al catálogo de productos en el que se encuentran los modelos de elevaciones.

Se selecciona el modelo digital del terreno con paso de malla de 25 m (MDT25), con la misma distribución de hojas que el MTN50. Este modelo utiliza el sistema geodésico de referencia ETRS89 y la proyección UTM en el huso correspondiente a cada hoja y también el huso 30 extendido (para hojas situadas en los husos 29 y 31). El MDT25 se ha obtenido por interpolación de modelos digitales del terreno de 5 m de paso de malla procedentes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).

Puesto que la descarga del MDT25 se realiza por hojas, es necesario estudiar qué hojas corresponden a las zonas a interpolar. Para ello se analiza la extensión que ocupan las estaciones a interpolar y se descargan las hojas correspondientes cubriendo con ellas una extensión un poco mayor que la que comprenden las estaciones.

Una vez descargadas todas las hojas, es necesario unir aquellas que correspondan con la misma zona para obtener un MDT25 unificado. Para ello desde la extensión ArcCatalog de ArcGIS se crea una geodatabase donde se introducen los ficheros con extensión ascii descargados, a continuación se crea un mosaico con los ascii de la geodatabase para posteriormente exportarlo a un único fichero ráster y poder trabajar con éste.

Se obtienen por tanto ocho ficheros ráster correspondientes a las ocho zonas establecidas en el apartado 4 para interpolar (véase Figura 26).

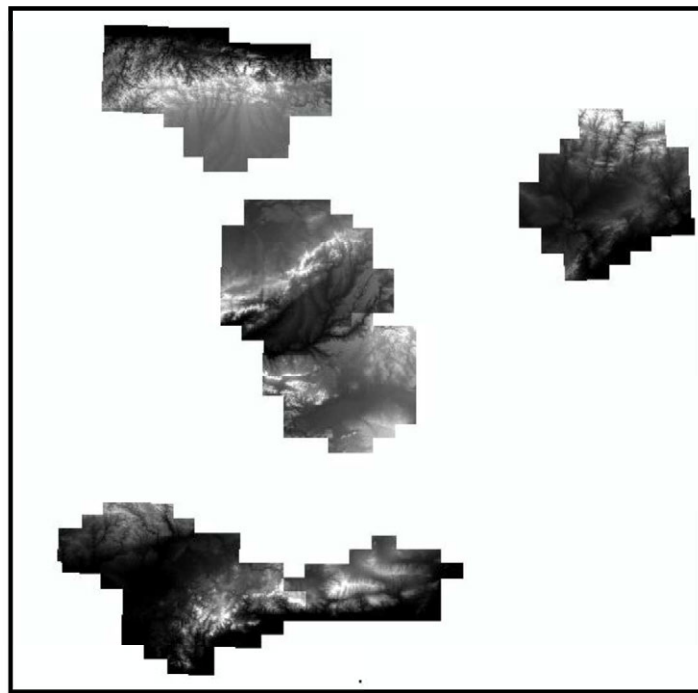


Figura 26. MDT25 correspondientes a las zonas a interpolar.

Para trabajar con el mismo sistema de coordenadas que tiene los ficheros de las estaciones de AEMET (WGS84 UTM 30N), es necesario modificar los ficheros ráster del MDT25 a este sistema. Desde la extensión ArcMap de ArcGIS en las propiedades de la capa se modifica el sistema de referencia pasando del ETRS89 UTM 30N obtenido en la descarga al WGS84 UTM 30N mediante la herramienta *Define Projection*.

### 6.3. Selección de fechas adecuadas para interpolar

Antes de comenzar con la interpolación se realiza un estudio de la cantidad de datos disponibles para cada variable y cada zona, con el objetivo de elegir aquellas fechas con mayor cantidad de observaciones posibles para poder obtener mejores resultados en la interpolación.



Se estudian los datos para las horas oportunas a interpolar (06:00 h y 14:00 h), y se construyen las siguientes tablas especificando las observaciones que se tiene para cada fecha y zona. Solo se tiene en cuenta las áreas de influencia de 100 km de radio, porque las áreas de influencia creadas con radio 60 km contienen muy pocas estaciones para interpolar, por lo que son descartadas en el trabajo.

➤ Zona costa barlovento (alta presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/09/2011 06:00:00	23	0 observaciones ≠ de 0
26/09/2011 14:00:00	23	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
16/12/2011 06:00:00	12	2 observaciones ≠ de 0
16/12/2011 14:00:00	12	8 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/03/2012 06:00:00	10	0 observaciones ≠ de 0
26/03/2012 14:00:00	11	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/06/2012 06:00:00	12	0 observaciones ≠ de 0
26/06/2012 14:00:00	12	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona costa barlovento (baja presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
25/10/2011 06:00:00	21	1 observaciones ≠ de 0
25/10/2011 14:00:00	20	2 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
15/01/2012 06:00:00	10	0 observaciones ≠ de 0
15/01/2012 14:00:00	11	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
30/04/2012 06:00:00	10 de 11	0 observaciones ≠ de 0
30/04/2012 14:00:00	10 de 11	0 observaciones ≠ de 0



Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/07/2012 06:00:00	10 de 11	0 observaciones ≠ de 0
26/07/2012 14:00:00	10 de 11	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona costa barlovento (calor extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
10/08/2012 06:00:00	11	0 observaciones ≠ de 0
10/08/2012 14:00:00	11	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona costa barlovento (frío extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
12/2/2012 06:00:00	11	0 observaciones ≠ de 0
12/2/2012 14:00:00	10	0 observaciones ≠ de 0

*Tabla 7. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona de costa barlovento*

➤ Zona costa llano (alta presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/09/2011 06:00:00	24	0 observaciones ≠ de 0
26/09/2011 14:00:00	24	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
16/12/2011 06:00:00	12	0 observaciones ≠ de 0
16/12/2011 14:00:00	12	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/03/2012 06:00:00	13	0 observaciones ≠ de 0
26/03/2012 14:00:00	13	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/06/2012 06:00:00	13	0 observaciones ≠ de 0
26/06/2012 14:00:00	11	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona costa barlovento (baja presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
25/10/2011 06:00:00	26	1 observaciones ≠ de 0
25/10/2011 14:00:00	26	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
15/01/2012 06:00:00	13	0 observaciones ≠ de 0
15/01/2012 14:00:00	13	4 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
30/04/2012 06:00:00	12	2 observaciones ≠ de 0
30/04/2012 14:00:00	12	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/07/2012 06:00:00	14	0 observaciones ≠ de 0
26/07/2012 14:00:00	14	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona costa llano (calor extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
10/08/2012 06:00:00	14	0 observaciones ≠ de 0
10/08/2012 14:00:00	14	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona costa llano (frío extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
12/2/2012 06:00:00	13	0 observaciones ≠ de 0
12/2/2012 14:00:00	3	0 observaciones ≠ de 0

Tabla 8. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona costa llano

➤ Zona costa sotavento (alta presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/09/2011 06:00:00	21	0 observaciones ≠ de 0
26/09/2011 14:00:00	21	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
16/12/2011 06:00:00	10	0 observaciones ≠ de 0
16/12/2011 14:00:00	10	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/03/2012 06:00:00	9	0 observaciones ≠ de 0
26/03/2012 14:00:00	9	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/06/2012 06:00:00	10	0 observaciones ≠ de 0
26/06/2012 14:00:00	10	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona costa sotavento (baja presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
25/10/2011 06:00:00	21	0 observaciones ≠ de 0
25/10/2011 14:00:00	21	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
15/01/2012 06:00:00	10	0 observaciones ≠ de 0
15/01/2012 14:00:00	11	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
30/04/2012 06:00:00	8	0 observaciones ≠ de 0
30/04/2012 14:00:00	10	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/07/2012 06:00:00	10	0 observaciones ≠ de 0
26/07/2012 14:00:00	10	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona costa sotavento (calor extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
10/08/2012 06:00:00	8	0 observaciones ≠ de 0
10/08/2012 14:00:00	9	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona costa sotavento (frío extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
12/2/2012 06:00:00	9	0 observaciones ≠ de 0
12/2/2012 14:00:00	9	0 observaciones ≠ de 0

Tabla 9. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona costa sotavento

➤ Zona interior llano regadío (alta presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/09/2011 06:00:00	43	0 observaciones ≠ de 0
26/09/2011 14:00:00	42	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
16/12/2011 06:00:00	10	0 observaciones ≠ de 0
16/12/2011 14:00:00	10	1 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/03/2012 06:00:00	16	0 observaciones ≠ de 0
26/03/2012 14:00:00	12	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/06/2012 06:00:00	15	0 observaciones ≠ de 0
26/06/2012 14:00:00	15	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona interior llano regadío (baja presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
25/10/2011 06:00:00	43	0 observaciones ≠ de 0
25/10/2011 14:00:00	42	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
15/01/2012 06:00:00	14	0 observaciones ≠ de 0
15/01/2012 14:00:00	14	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
30/04/2012 06:00:00	14	6 observaciones ≠ de 0
30/04/2012 14:00:00	13	1 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/07/2012 06:00:00	17	0 observaciones ≠ de 0
26/07/2012 14:00:00	13	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona interior llano regadío (calor extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
10/08/2012 06:00:00	15	0 observaciones ≠ de 0
10/08/2012 14:00:00	14	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona interior llano regadío (frío extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
12/2/2012 06:00:00	17	0 observaciones ≠ de 0
12/2/2012 14:00:00	16	0 observaciones ≠ de 0

*Tabla 10. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona interior llano regadío*

➤ Zona interior llano seco (alta presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/09/2011 06:00:00	20	0 observaciones ≠ de 0
26/09/2011 14:00:00	20	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
16/12/2011 06:00:00	9	0 observaciones ≠ de 0
16/12/2011 14:00:00	9	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/03/2012 06:00:00	8	0 observaciones ≠ de 0
26/03/2012 14:00:00	9	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/06/2012 06:00:00	9	0 observaciones ≠ de 0
26/06/2012 14:00:00	8	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona interior llano seco (baja presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
25/10/2011 06:00:00	19	0 observaciones ≠ de 0
25/10/2011 14:00:00	20	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
15/01/2012 06:00:00	8	0 observaciones ≠ de 0
15/01/2012 14:00:00	9	2 observaciones ≠ de 0



Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
30/04/2012 06:00:00	9	0 observaciones ≠ de 0
30/04/2012 14:00:00	7	1 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/07/2012 06:00:00	8	0 observaciones ≠ de 0
26/07/2012 14:00:00	11	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona interior llano seco (calor extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
10/08/2012 06:00:00	9	0 observaciones ≠ de 0
10/08/2012 14:00:00	9	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona interior llano seco (frío extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
12/2/2012 06:00:00	8	0 observaciones ≠ de 0
12/2/2012 14:00:00	9	0 observaciones ≠ de 0

Tabla 11. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona interior llano seco

➤ Zona interior montañoso dos vertientes (alta presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/09/2011 06:00:00	44	0 observaciones ≠ de 0
26/09/2011 14:00:00	44	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
16/12/2011 06:00:00	16	0 observaciones ≠ de 0
16/12/2011 14:00:00	16	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/03/2012 06:00:00	16	0 observaciones ≠ de 0
26/03/2012 14:00:00	19	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/06/2012 06:00:00	21	0 observaciones ≠ de 0
26/06/2012 14:00:00	20	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona interior montuoso dos vertientes (baja presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
25/10/2011 06:00:00	40	1 observaciones ≠ de 0
25/10/2011 14:00:00	40	1 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
15/01/2012 06:00:00	16	0 observaciones ≠ de 0
15/01/2012 14:00:00	17	1 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
30/04/2012 06:00:00	16	1 observaciones ≠ de 0
30/04/2012 14:00:00	17	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/07/2012 06:00:00	14	0 observaciones ≠ de 0
26/07/2012 14:00:00	16	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona interior montuoso dos vertientes (calor extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
10/08/2012 06:00:00	19	0 observaciones ≠ de 0
10/08/2012 14:00:00	19	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona interior montuoso dos vertientes (frío extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
12/2/2012 06:00:00	11	0 observaciones ≠ de 0
12/2/2012 14:00:00	14	0 observaciones ≠ de 0

Tabla 12. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona interior montuoso dos vertientes

➤ Zona interior montuoso barlovento (alta presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/09/2011 06:00:00	44	0 observaciones ≠ de 0
26/09/2011 14:00:00	44	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
16/12/2011 06:00:00	18	0 observaciones ≠ de 0
16/12/2011 14:00:00	19	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/03/2012 06:00:00	21	0 observaciones ≠ de 0
26/03/2012 14:00:00	20	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/06/2012 06:00:00	22	0 observaciones ≠ de 0
26/06/2012 14:00:00	21	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona interior montuoso barlovento (baja presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
25/10/2011 06:00:00	46	1 observaciones ≠ de 0
25/10/2011 14:00:00	45	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
15/01/2012 06:00:00	18	0 observaciones ≠ de 0
15/01/2012 14:00:00	20	6 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
30/04/2012 06:00:00	20	3 observaciones ≠ de 0
30/04/2012 14:00:00	21	2 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/07/2012 06:00:00	23	0 observaciones ≠ de 0
26/07/2012 14:00:00	22	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona interior montuoso barlovento (calor extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
10/08/2012 06:00:00	23	0 observaciones ≠ de 0
10/08/2012 14:00:00	22	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona interior montuoso barlovento (frío extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
12/2/2012 06:00:00	20	0 observaciones ≠ de 0
12/2/2012 14:00:00	19	0 observaciones ≠ de 0

Tabla 13. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona interior montuoso barlovento

➤ Zona interior montuoso sotavento (alta presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/09/2011 06:00:00	37	0 observaciones ≠ de 0
26/09/2011 14:00:00	37	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
16/12/2011 06:00:00	16	2 observaciones ≠ de 0
16/12/2011 14:00:00	16	8 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/03/2012 06:00:00	15	0 observaciones ≠ de 0
26/03/2012 14:00:00	15	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/06/2012 06:00:00	17	0 observaciones ≠ de 0
26/06/2012 14:00:00	17	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona interior montuoso sotavento (baja presión):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
25/10/2011 06:00:00	35	1 observaciones ≠ de 0
25/10/2011 14:00:00	33	2 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
15/01/2012 06:00:00	14	0 observaciones ≠ de 0
15/01/2012 14:00:00	16	0 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
30/04/2012 06:00:00	16	0 observaciones ≠ de 0
30/04/2012 14:00:00	17	1 observaciones ≠ de 0

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
26/07/2012 06:00:00	16	0 observaciones ≠ de 0
26/07/2012 14:00:00	16	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona interior montuoso sotavento (calor extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
10/08/2012 06:00:00	15	0 observaciones ≠ de 0
10/08/2012 14:00:00	16	0 observaciones ≠ de 0

➤ Zona interior montuoso dos vertientes (frío extremo):

Fecha	Nº Observaciones Temperatura	Nº Observaciones Precipitación
12/2/2012 06:00:00	17	0 observaciones ≠ de 0
12/2/2012 14:00:00	16	0 observaciones ≠ de 0

*Tabla 14. Conjunto de observaciones por fecha y hora de las variables a estudiar en la zona interior montuoso sotavento*

#### 6.4. Aplicación de los métodos de interpolación seleccionados

Una vez realizado el estudio del apartado anterior, se eligen aquellas fechas y horas en las que existe una mayor cantidad de observaciones adecuadas para interpolar. En un primer caso y para realizar la primera prueba, han sido seleccionados los siguientes casos para interpolar la variable de temperatura:

- Zona costera barlovento (alta presión), 16/12/2011 a las 14:00 h
- Zona costera llano (baja presión), 15/01/2012 a las 14:00 h
- Zona costera sotavento (calor extremo), 10/08/2012 a las 14:00 h
- Zona interior llano regadío (baja presión), 30/04/2012 a las 06:00 h
- Zona interior llano seco (baja presión), 15/01/2012 a las 14:00 h
- Zona interior montuoso dos vertientes (alta presión), 26/09/2011 a las 06:00 h
- Zona interior montuoso barlovento (baja presión), 15/01/2012 a las 14:00 h
- Zona interior montuoso sotavento (alta presión), 16/12/2011 a las 14:00 h

En cuanto a la variable de precipitación se han elegido solo aquellas zonas donde los registros de la cantidad de lluvia han sido distintos de cero, para no obtener en las áreas a interpolar un valor nulo. Por lo tanto se han seleccionado los mismos casos anteriores exceptuando las zonas de costa sotavento (calor extremo) y de interior montuoso dos vertientes.

##### 6.4.1. Interpolación de temperatura

Para esta variable climática, después de haber elegido las zonas adecuadas, se debe realizar la selección del 85% de las estaciones para interpolar. De este modo se comprobará con el 15% restante la fiabilidad del método de interpolación.



A continuación se detallan las capas *shapefile*, las horas de interpolación y las estaciones utilizadas por zonas para las variables de temperatura y precipitación.

Una vez preparado el conjunto de datos, se aplican los métodos de interpolación de IDWA, *Co-kriging*, *Thin plate smoothing splines* y regresión múltiple. En el método *co-kriging* es necesaria la utilización de una variable auxiliar, en este caso el MDT25 correspondiente a la zona creado en el apartado 6.2. En el método *thin plate smoothing splines* se realiza la interpolación con distintos valores de suavizado “R”, que permiten un mejor ajuste de la variable a predecir y un tamaño de celda de 25 m que se corresponde con el tamaño del celda del MDT25. Por último en el método de la regresión múltiple es utilizado, al igual que en el método *co-kriging*, el modelo digital de elevaciones.

Se debe tener en cuenta que aquellas capas que tengan pocas estaciones, no son adecuadas para la interpolación. Por lo que se procura elegir aquellas que contengan la mayor cantidad de estaciones.

En primer lugar y considerándose como la prueba 1, se realiza la selección del 85% de la estaciones sobre la capa *shapefile* elegida (véase Tabla 15).

ZONA	Capa <i>shape</i> utilizada	Hora	Estaciones	Id. Estaciones eliminadas
Costa barlovento	costa_blv100_apr_111216	14:00	12	08011, 08031
Costa llano	costa_llano100_bpr_120115	14:00	13	08452, 08384
Costa sotavento	costa_sot100_apr_110926	06:00	20	6267X, 08486, 08487
Interior llano regadío	interior_llano_regadio100_bpr_120430	06:00	14	9855E, 08175
Interior llano seco	interior_llano_secano100_apr_110926	14:00	20	3254Y, 08276, 4093Y
Interior montañoso dos vertientes	interior_montu_2vert100_apr_110926	06:00	44	2503B, 2430Y, 3330Y, 08217, 08220, 08145, 08219
Interior montañoso barlovento	interior_montu_barlo100_bpr_120115	14:00	20	08391, 08453, 08481
Interior montañoso sotavento	interior_montu_sotav100_apr_111216	14:00	16	08031, 1179B

Tabla 15. Datos para interpolación de temperatura (prueba 1)

Una vez aplicados los métodos de interpolación (IDWA, *Co-kriging*, *Thin plate smoothing splines* y regresión múltiple) para la variable de temperatura en esta primera prueba, debemos modificar el conjunto de datos realizando una selección del 85% distinta a la primera, dando lugar a la prueba 2. De este modo conseguiremos chequear distintas posiciones de las variables a predecir y obtener mayor información para determinar el método de interpolación más preciso (véase Tabla 16).

Se aplican sobre el nuevo conjunto de datos los métodos de interpolación anterior y se analizan los resultados.

ZONA	Capa <i>shape</i> utilizada	Hora	Estaciones	Id. Estaciones eliminadas
Costa barlovento	costa_blv100_apr_111216	14:00	12	1279X, 1226X
Costa llano	costa_llano100_bpr_120115	14:00	13	08453, 08389
Costa sotavento	costa_sot100_apr_110926	06:00	20	6277X, 08488, 5515X
Interior llano regadío	interior_llano_regadio100_bpr_120430	06:00	14	0042Y, 08112
Interior llano seco	interior_llano_secano100_apr_110926	14:00	20	3099Y, 08273, 4095Y
Interior montañoso dos vertientes	interior_montu_2vert100_apr_110926	06:00	44	08142, 2453E, 08208, 2471Y, 08222, 3104Y, 08143
Interior montañoso barlovento	interior_montu_barlo100_bpr_120115	14:00	20	08452, 08397, 08443
Interior montañoso sotavento	interior_montu_sotav100_apr_111216	14:00	16	08055, 08058

Tabla 16. Datos para interpolación de temperatura (prueba 2)

Por último, como tercera prueba de interpolación se trabaja con capas distintas a las utilizadas hasta ahora, realizando la selección del 85% de las estaciones a interpolar, para poder comprobar con el 15% restante la fiabilidad del método de interpolación (véase Figura 17).

Una vez preparado el conjunto de datos con las nuevas capas seleccionadas, se aplican de los métodos de interpolación anteriormente citados (IDWA, *Co-kriging*, *Thin plate smoothing splines* y regresión múltiple) con los parámetros oportunos.

ZONA	Capa <i>shape</i> utilizada	Hora	Estaciones	Id. Estaciones eliminadas
Costa barlovento	costa_blv100_apr_110926	06:00	20	08009, 08052, 1234P
Costa llano	costa_llano100_bpr_111025	14:00	26	4575X, 08384, 08451, 08389
Costa sotavento	costa_sotav100_bpr_111025	06:00	21	6267X, 6281X, 08487
Interior llano regadío	interior_llano_regadio100_fr_120212	06:00	17	08112, 08168, 08175
Interior llano seco	interior_llano_secano100_bpr_111025	14:00	17	3254Y, 08276, 4093Y
Interior montañoso dos vertientes	interior_montu_2vert100_apr_120626	06:00	21	08213, 3343Y, 08221
Interior montañoso barlovento	interior_montu_barlo100_apr_110926	14:00	44	5790Y, 08453, 5950X, 6057X, 6076X, 6127X, 5998X
Interior montañoso sotavento	interior_montu_sotav100_bpr_111025	06:00	35	1223P, 2664B, 2276B, 08032, 1179B

Tabla 17. Datos para interpolación de temperatura (tercera prueba)

#### 6.4.2. Interpolación de precipitación

Para esta segunda variable climática se realiza el mismo proceso del apartado 6.4.1 que se ha realizado para la variable de temperatura. Se generan tres pruebas distintas de interpolación modificando en la segunda las estaciones seleccionadas

(véase Tabla 19), y modificando la capa *shapefile* de origen para la última prueba (véase Tabla 20).

Una vez preparados los conjuntos de datos, se aplican los métodos de interpolación anteriormente citados (IDWA, *Co-kriging*, *Thin plate smoothing splines* y regresión múltiple) con los parámetros oportunos.

ZONA	Capa <i>shape</i> utilizada	Hora	Estaciones	Id. Estaciones eliminadas
Costa barlovento	costa_blv100_apr_111216	14:00	12	08011, 08031
Costa llano	costa_llano100_bpr_120115	14:00	13	08452, 08384
Interior llano regadío	interior_llano_regadio100_bpr_120430	06:00	14	9855E, 08175
Interior llano seco	interior_llano_secano100_bpr_120115	14:00	9	08276
Interior montañoso barlovento	interior_montu_barlo100_bpr_120115	14:00	20	08391, 08443
Interior montañoso sotavento	interior_montu_sotav100_apr_111216	14:00	16	08032, 08057

Tabla 18. Datos para interpolación de precipitación (prueba 1)

ZONA	Capa <i>shape</i> utilizada	Hora	Estaciones	Id. Estaciones eliminadas
Costa barlovento	costa_blv100_apr_111216	14:00	12	1279X, 1226X
Costa llano	costa_llano100_bpr_120115	14:00	13	08453, 08389
Interior llano regadío	interior_llano_regadio100_bpr_120430	06:00	14	0042Y, 08112
Interior llano seco	interior_llano_secano100_bpr_120115	14:00	9	4075Y
Interior montañoso barlovento	interior_montu_barlo100_bpr_120115	14:00	20	08399, 08453
Interior montañoso sotavento	interior_montu_sotav100_apr_111216	14:00	16	08055, 1179B

Tabla 19. Datos para interpolación de precipitación (prueba 2)

ZONA	Capa <i>shape</i> utilizada	Hora	Estaciones	Id. Estaciones eliminadas
Costa barlovento	costa_blv100_bpr_111025	14:00	20	1302F, 1223P, 1199X
Costa llano	costa_llano100_bpr_120430	06:00	12	08452, 08389
Interior llano regadío	interior_llano_regadio100_apr_111216	14:00	12	9947X, 08112
Interior montañoso barlovento	interior_montu_barlo100_bpr_120430	06:00	20	08399 , 6045X
Interior montañoso sotavento	interior_montu_sotav100_bpr_111025	14:00	33	1179B, 9016X, 2568D, 1223P, 2362C

Tabla 20. Datos para interpolación de precipitación (prueba 3)

## 7. Resultados

Con las gráficas obtenidas del apartado 3.2 se procede a realizar un análisis que se encuentra fuertemente condicionado por la calidad de las observaciones, y que además se centra en las llamadas gráficas válidas (“buenas”), donde los datos están completos.

Una vez aplicados los métodos de interpolación citados en el apartado 6.4, se construyen unas tablas con los resultados obtenidos tras comprobar con el 15% de las estaciones restantes la bondad de los métodos aplicados (véase Anexo 2).

En las tablas se muestra el método utilizado en la interpolación, los errores obtenidos en cada método, las estaciones eliminadas que constituyen el 15% del total, el valor real de la estación y el valor interpolado de éstas estaciones eliminadas para cada una de las zonas.

Además se adjuntan los mapas de interpolación obtenidos para cada zona y método, atendiendo a las características empleadas en cada uno de ellos (véase Anexo 3).

### 7.1. Análisis y clasificación de las gráficas de temperatura y precipitación

La descripción de las características más significativas de cada una de ellas lleva al establecimiento de una serie de modelos. Las características consideradas, además de la identificación de la estación, del día y de la franja horaria (mañana, tarde y noche) se centra en la caracterización del contexto principal de variación térmica (cuánto se modifica la temperatura durante el periodo fundamental de observación); en la descripción de la referencia de las precipitaciones y en su modelización cuantitativa apoyándose en la evolución de la curva térmica, la posición del rayo en la curva y la tipificación de una serie de modelos de situación de los rayos respecto a la tendencia térmica.

Para esta última fase se ha acudido a la caracterización morfológica, en el símil de que la curvatura representa un perfil topográfico. De este modo se puede acudir a las expresiones de hombrera, cornisa, escarpe, bárcena, cuesta o declive.

La situación diurna (franjas horarias de mañana y tarde) de los rayos sobre la curvatura térmica, en el caso de sufrir un descenso brusco de temperatura, podrá encontrarse sobre la hombrera, parte más suave previa al descenso (véase Figura 27), en la cornisa del escarpe (véase Figura 28), en el propio escarpe (véase Figura 29) o incluso con un ligero alejamiento, en el inicio tenue de una cierta recuperación tras el escarpe, a modo de acontecimientos de impactos desfasados respecto a la caída térmica (véase Figura 30).



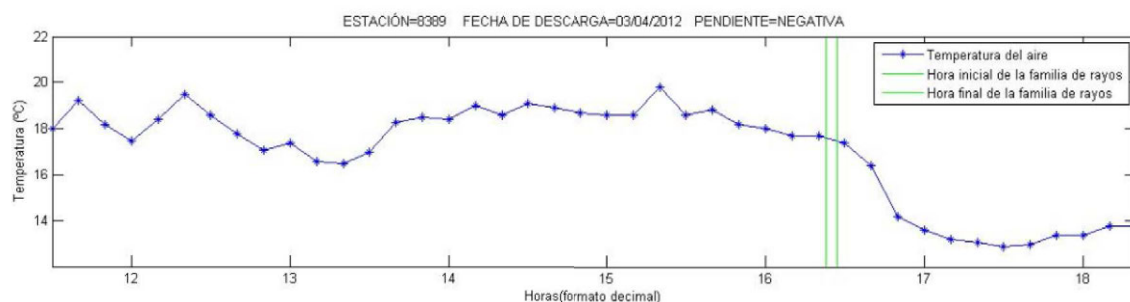


Figura 27. La tormenta se sitúa en la hombrera de la curvatura térmica

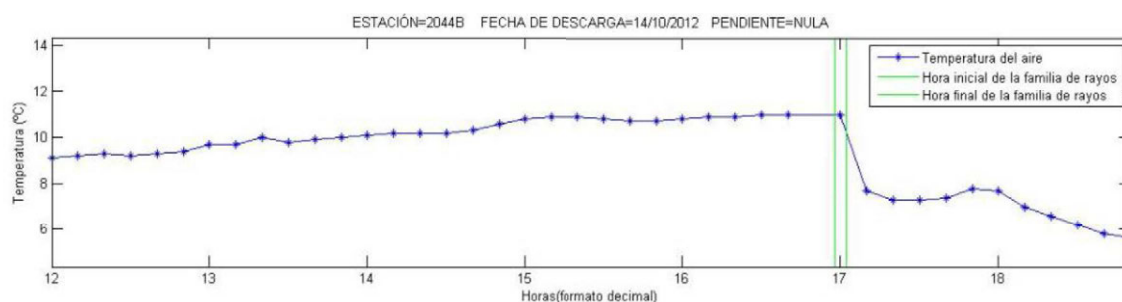


Figura 28. La tormenta se sitúa sobre la cornisa de la curvatura térmica

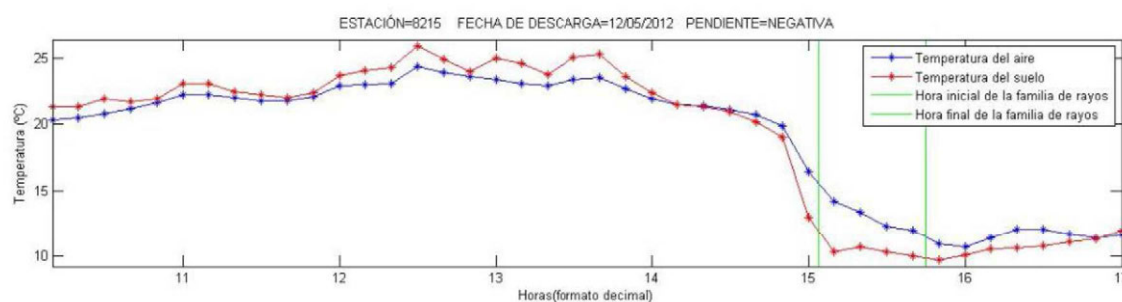


Figura 29. La tormenta se sitúa situada sobre el escarpe de la curvatura térmica

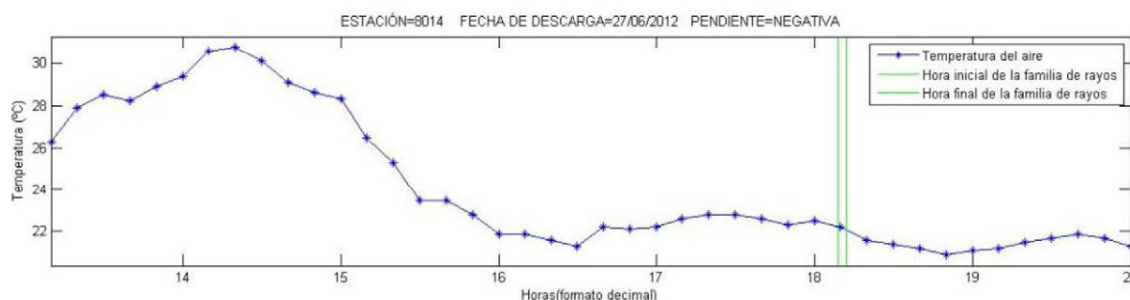


Figura 30. La tormenta situada con cierto alejamiento del escarpe "tras escarpe"

En el caso de que el rayo se encuentre en un descenso gradual sobre la curvatura térmica, se permite diferenciar entre pendientes suaves, designadas con el nombre de declive (véase Figura 31), cuevas donde es más notable la pendiente



(véase Figura 32) o “pie de bárcenas” de largas trayectorias de descenso, correspondientes al símil morfográfico de bárcenas (véase Figura 33).

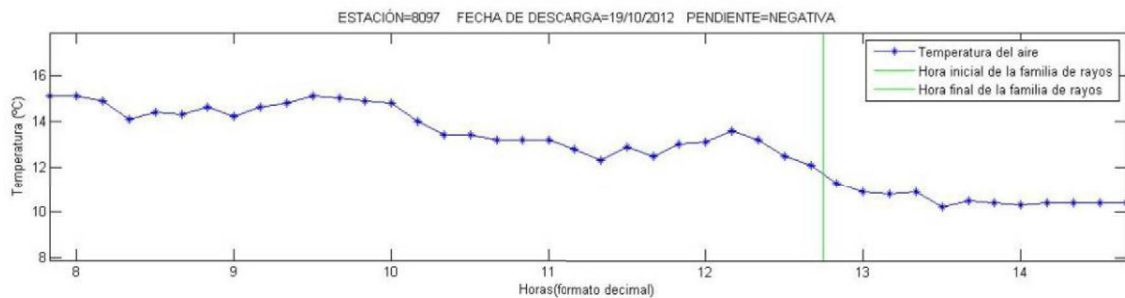


Figura 31. Rayo situado sobre descenso gradual denominado “declive”

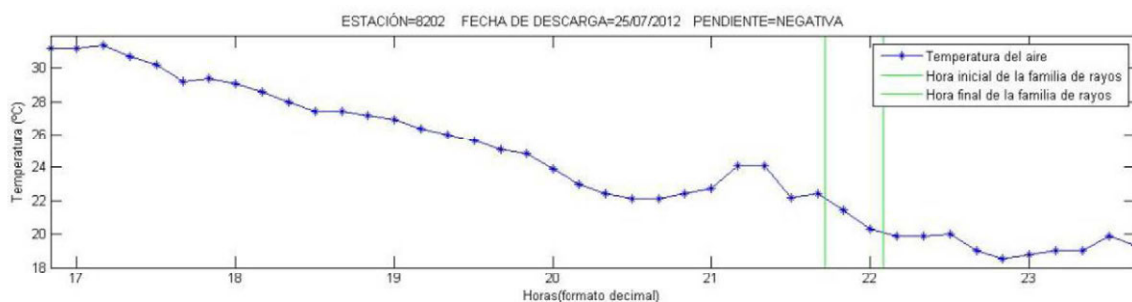


Figura 32. Rayo situado sobre descenso gradual con pendiente más notable que en el declive “cuesta”

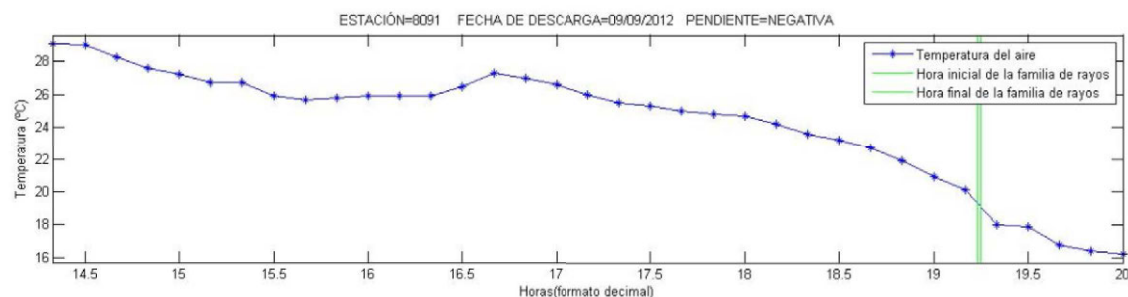


Figura 33. Rayo situado sobre “pie de bárcena”

Por el contrario la situación nocturna de los rayos individuales se caracteriza por un comportamiento muy diferente, que no consiste en la aparición de nuevos modelos, sino en la distribución de frecuencia de las formas. Entre ellas destacan las situaciones con poca variación térmica designada como llanura (véase Figura 34), y las situaciones de tímidos descensos que cobran rapidez, caracterizados como vallejitos en llanura (véase Figura 35).

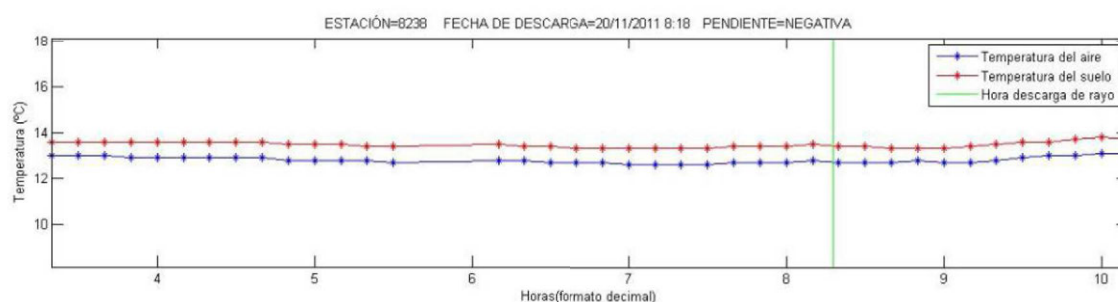


Figura 34. Situación con poca variación térmica nocturna

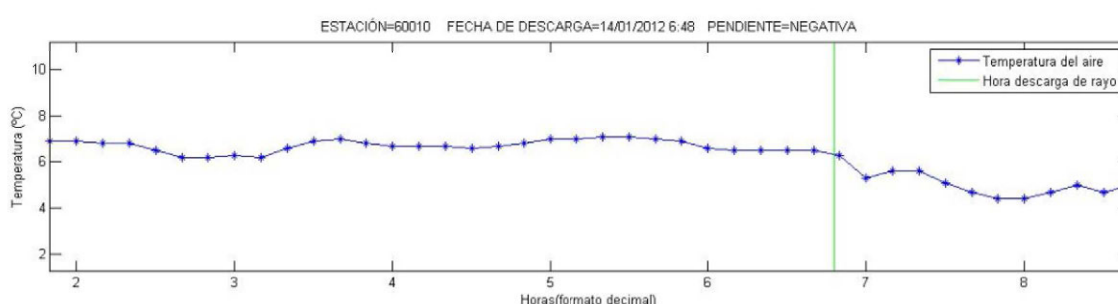


Figura 35. Situación de tímida variación térmica nocturna (vallejos en llanura)

## 7.2. Resultados obtenidos para la variable de temperatura

En la zona costa barlovento el método que mejor se adapta a los valores reales de las estaciones chequeadas (el 15% de la selección) es el método *thin plate spline* con diferentes valores de "R" para las dos primeras pruebas realizadas. Sin embargo, en la última prueba, aquella en que se ha seleccionada una capa *shapefile* distinta para realizar la selección destaca la regresión múltiple. En una de las pruebas se ha detectado que se ha eliminado de la selección una de las estaciones que se encuentra en el borde de la zona, por lo que ésta tiene el mayor error al interpolar.

Para la zona costera con terreno llano, destaca el método de la regresión múltiple y el *thin plate spline*. Al trabajar con un mayor número de estaciones, y por tener un terreno llano, el *co-kriging* es un método que funciona bien al igual que ocurre con el IDWA, pero el primero tiene como inconveniente el elevado tiempo que conlleva su ejecución.

En la zona costera sotavento el método *co-kriging* tiene una precisión aceptable, pero se deduce que la posición de las estaciones eliminadas (15% de la selección) afecta bastante en los errores obtenidos.

El método de la regresión múltiple funciona bien para las zonas de interior, tanto llano como regadío, destacando sobre todo en las dos primeras pruebas realizadas sobre la primera zona. El *co-kriging* también es un buen método para la zona interior regadío, pero es descartado por su lenta ejecución.

En cuanto a la zona interior montuosa dos vertientes, es difícil destacar un método en cuanto a su precisión, porque se obtienen valores con errores bastante elevados.

Pese que el método *thin plate spline* es el que mejor se adapta a los valores reales en la zona interior montuosa barlovento, cabe destacar que el mejor ajuste se obtiene con distintos parámetros “R” en las dos primeras pruebas realizadas a pesar de trabajar con la misma capa *shapefile*.

Y por último se obtienen un errores muy elevados en la zona interior montuosa sotavento, haciendo que el método que más se aproxime a los valores reales sea el *thin plate spline*.

### 7.3. Resultados obtenidos para la variable de precipitación

Para la variable climática de precipitación se dificulta la obtención de un buen método de interpolación porque existen muy pocos registros para realizar comparaciones.

El método que destaca en todas las zonas por su sencilla y rápida ejecución es el IDWA, salvo para aquellas zonas montañosas en las que destaca el *co-kriging* generando errores menores porque existe un número elevado de estaciones.

## 8. Conclusiones

Una vez detallada la clasificación que se realiza para caracterizar las gráficas en el apartado X, se obtienen los siguientes resultados en función de las gráficas consideradas como familias de rayos, rayos individuales con franja horaria diurna y rayos individuales con franja horaria nocturna.

En el primer y segundo grupo se puede observar que el impacto de los rayos provoca un descenso térmico, independientemente del momento del día o de la noche. Este descenso térmico es variado, a veces brusco y otras continuo, pero suele encontrarse en un rango entre 2 y 10 ° C.

Los descensos bruscos, entre los que se han destacado la hombrera, la cornisa, el escarpe, el pie de escarpe o el tras escarpe, se asocian a precipitaciones; no a precipitaciones necesariamente abundantes, pero tampoco a tormentas secas.

Cuando los descensos son graduales, pueden o no estar asociados a las precipitaciones, y lo normal es que los rayos se sitúen al final del descenso. A este tipo de descensos se les asocian las tormentas secas.

El resultado estadístico para estos dos grupos, gráficas familia de rayos y rayos individuales diurnos, se puede ver en la tabla 21 y 22 respectivamente.

CANTIDAD	TIPO	PORCENTAJE
2	CORNISA	5
4	CUESTA	11
7	DECLIVE	19
4	ESCARPE	11
4	HOMBRERA	11
2	LLANURA	5
8	PIE DE BÁRCENA	22
6	TRAS ESCARPE	16

Tabla 21. Resultado estadístico para las gráficas de familias de rayos

CANTIDAD	TIPO	PORCENTAJE
14	CORNISA	8
18	CUESTA	11
32	DECLIVE	19
36	ESCARPE	21
9	HOMBRERA	5
28	LLANURA	17
15	PIE DE BÁRCENA	9
17	TRAS ESCARPE	10

Tabla 22. Resultado estadístico para las gráficas de rayos individuales diurnos

El en último grupo estudiado, donde se encuentran aquellas gráficas de rayos individuales con horario nocturno, la mitad de los casos se caracteriza por encontrarse con tímidos descensos (de 1 y 2 °C) caracterizados como vallejos en llanura. Aunque también se encuentran las situaciones clásicas vistas en los dos grupos anteriores.

El reducido número de este grupo de gráficas, arroja los siguientes resultados (véase Tabla 23).

CANTIDAD	TIPO	PORCENTAJE
2	ESCARPE	10
3	HOMBRERA	14
11	LLANURA	52
1	TRAS ESCARPE	5
4	VALLEJO EN LLANURA	19

Tabla 23. Resultado estadístico para las gráficas de rayos individuales nocturnos

Por otro lado, tras revisar los resultados de interpolación obtenidos en el apartado 7, se determina que los conjuntos de datos analizados no resultan favorables al estudio, ya que son bastante escasos en el número de estaciones. Además también se puede concluir que la posición de las estaciones eliminadas para el posterior chequeo influye en los resultados de la interpolación, incrementando los errores aquellos puntos eliminados que más al borde del conjunto de datos se encuentre.

A pesar de ello los métodos que mejor aproximan sus valores interpolados a la realidad para la variable de temperatura son *thin plate smoothing* con distintos valores de "R" y la regresión múltiple. En algunas zonas se ha superado la precisión con el método *co-kriging* pero frente a los dos anteriores es descartado por su lentitud de procesado.

Por otro lado y teniendo en cuenta la variable de precipitación, el mejor método en todas las zonas por sus resultados, sencillez y rápida ejecución es el IDWA, salvo para zonas montañosas donde conviene utilizar el *co-kriging*.



## 9. Presupuesto

El presupuesto es una valoración económica previa que se realiza de un producto o servicio, y engloba la previsión total de los costes involucrados incrementados con un beneficio.

En el presupuesto se detalla el presupuesto de ejecución material (PEM) y el presupuesto de ejecución por contrata. El PME es la suma del presupuesto de las distintas partidas que componen el documento, sin incluir los gastos generales, el beneficio industrial ni el IVA. Y por el contrario, el presupuesto de ejecución por contrata es la suma del PEM más los gastos generales de la empresa, el beneficio industrial y el IVA.

Los gastos generales son los que el contratista tiene por el hecho de ejercer una actividad empresarial y que son distintos de los costes de ejecución. Serían los gastos de oficinas generales (no de obra), gastos fiscales, financieros, tasas de administración, etc. En obras oficiales el beneficio industrial más utilizado es el del 6%, y los gastos generales el 13%.

Teniendo en cuenta como recursos un topógrafo, un ordenador, los *softwares* utilizados MATLAB, ArcGIS, QuantumGIS o PostgreSQL y la reprografía, se realiza mediante *Microsoft Project* el presupuesto para el trabajo.

Se han considerado como precios unitarios:

- Honorarios del topógrafo → 18€/h, que a jornada completa (8h) resulta un coste por día de 144€.
- Coste ordenador → supone aproximadamente 800€ con un período de amortización de tres años (755 días laborables). El coste diario resulta 1€/día.
- Coste de MATAB → el coste de una licencia anual asciende a 2000€ (252 días laborables) resultando un coste por día de 8€.
- Coste de ArcGIS → el coste de una licencia anual asciende a 1500€ (252 días laborables) resultando un coste diario de 6€.
- Reprografía → el precio de la memoria entregada por tomo es de 38€/tomo.

Con los anteriores recursos y el programa ofimático anteriormente citado se realiza el presupuesto, obteniendo el resumen general del presupuesto, el diagrama de Gantt y un informe del resumen de trabajo de cada recurso.

El resumen general del presupuesto muestra las partidas principales que engloba el trabajo, calculando el PEM y el presupuesto de ejecución por contrata (véase Figura 27).

<b>RESUMEN GENERAL DEL PRESUPUESTO</b>		
		<b>Coste</b>
Estado del arte		2.755,00 €
Tratamiento de datos		5.637,00 €
Interpretación de datos obtenidos		725,00 €
Selección de métodos de interpolación		749,00 €
Aplicación métodos de interpolación		1.782,00 €
Análisis resultados obtenidos		580,00 €
Conclusiones		290,00 €
Creación Memoria		2.289,00 €
<b>PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL</b>		<b>14.807,00 €</b>
Beneficio Industrial	6%	888,42 €
Gastos Generales	13%	1.924,91 €
Total		17.620,33 €
IVA	21%	3.700,27 €
<b>PRESUPUESTO EJECUCIÓN POR CONTRATA</b>		<b>21.320,60 €</b>

Figura 36. Resumen general del presupuesto del trabajo

En el informe visual que se extrae del presupuesto realizado en *Microsoft Project*, es posible analizar el trabajo realizado por cada uno de los recursos que han formado parte del trabajo (véase Figura 28).



Figura 37. Informe visual del resumen de trabajo de los recursos empleados

Por último se obtiene el diagrama de Gantt, herramienta que permite conocer el calendario de tareas o actividades que se producen desde el comienzo del trabajo.